

**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)

Редактор М.А. Сухова

Корректор Н.В. Кучина

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 17.09.2025.

Формат 60х84 1/8.

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

Заказ № 129.

Дата выхода в свет 24.09.2025.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

Цена 2500 руб.

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
АРХИТЕКТУРА
И СТРОИТЕЛЬСТВО
3(64)/2025**

Содержание

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5**

**Королев Е.В., Гришина А.Н.,
Данилов А.М., Айзенштадт А.М.
СТРУКТУРНОЕ УРАВНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 5**

**Дергунова Е.С., Гончарова М.А., Ерофеев В.Т.
КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЫНОСЛИВОСТИ БЕТОНОВ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ БИОДОБАВКАМИ.... 20**

**Идрисов И.Х., Болдырев Г.Г.,
Макридин Н.И., Максимова И.Н.
ИСПЫТАНИЯ ГЛИНОШЛАКОВЫХ
КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ
ОДНОПЛОСКОСТНОГО СРЕЗА
И ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ 26**

**Абдрахимов В.З.
ВЛИЯНИЕ ФОСФОРНОГО ШЛАКА
НА ПОРИСТОСТЬ КЛИНКЕРНОГО КИРПИЧА
НА ОСНОВЕ ОТХОДА ЦВЕТНОЙ
МЕТАЛЛУРГИИ..... 43**

**Тараканов О.В., Ивашенко Ю.Г.,
Ерофеева И.В.
РАСШИРЕНИЕ БАЗЫ МИНЕРАЛЬНЫХ
ДОБАВОК ДЛЯ БЕТОНОВ НОВОГО
ПОКОЛЕНИЯ..... 54**

**Логанина В.И., Пылаев В.С., Филинова М.И.
ТРЕЩИНСТОЙКОСТЬ ИЗВЕСТКОВЫХ
ПОКРЫТИЙ С ДОБАВКАМИ
ПОЛИСАХАРИДОВ 65**

**Кузина В.В., Рыжов А.Д.,
Варенцов В.К., Кошев А.Н.
ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ РЕАКЦИОННОЙ
ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕГРАФИТОВОГО
ВОЛОКНИСТОГО ЭЛЕКТРОДА
ПРИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ 73**

**Шаповалова А.В., Агеева М.С.,
Клюев С.В., Клюев А.В.
ТОНКОМОЛОТЫЕ ДОБАВКИ ДЛЯ БЕТОННОЙ
СМЕСИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО
ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА
И НАНОЗОЛЫ 78**

© Авторы публикаций, 2025

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2025

© ПГУАС, 2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	87	Фролов М.В., Курдин А.В. ОЦЕНКА ТЕПЛОПOTЕРЬ ЧЕРЕЗ НАРУЖНЫЕ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОДВАЛОВ	163
Шени А.И., Быков А.Н. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	87	Миронов В.В., Ерофеев Е.А., Иванюшин Ю.А., Миронов Д.В., Степанов О.А. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ И ЛЬДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВОЛН	172
Корягин С.И., Шарков О.В., Великанов Н.Л. ПРИМЕНЕНИЕ НАКЛАДНЫХ ЛИСТОВ НА ЗАКЛЕПКАХ ПРИ РЕМОНТЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	97	Хомутов А.О., Усачев А.П., Рулев А.В. РАЗРАБОТКА МЕТОДА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО УСТРАНЕНИЮ ОТЛОЖЕНИЙ МЕХПРИМЕСЕЙ МЕЖДУ ФИЛЬТРУЮЩИМИ КАРТРИДЖАМИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ	181
Бедов А.И., Ласьков Н.Н., Габитов А.И., Недосеко И.В., Салов А.С. ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УСИЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТОВ	102	АРХИТЕКТУРА	190
Айзатуллин М.М., Зиятдинов С.Б., Сабитов Л.С., Гарькина И.А. УЗЛЫ СОПРЯЖЕНИЙ ПОРТАЛЬНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ОПОР	111	Гречишкин А.В., Андрианов К.А., Леденев В.И., Матвеева И.В. АРХИТЕКТУРА И КОНСТРУКЦИИ ЦЕРКВИ ВОСКРЕСЕНИЯ ХРИСТА СПАСИТЕЛЯ В С. КРАСНОЕ ЗНАМЯ ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ	190
Титова Е.И., Акимова И.В. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	121	Лапшина Е.Г., Димаков Н.Д. ДЕРЕВЯННАЯ ВЫСОТНАЯ АРХИТЕКТУРА: БАШНИ	199
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ	126	Береговой А.М. ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ И РАДОНОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ – ЗЕМЛЕСКРЕБОВ	209
Бодров М. В., Руин А.Е., Смыков А.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ВОДЯНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ	126	Гладышева М.В., Черушова Н.В. МЕТОД ИМИТАЦИИ В АРХИТЕКТУРЕ ПОСТМОДЕРНИЗМА	216
Еремкин А.И., Пономарева И.К., Чудайкина Т.Н., Мишин А.А. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В КУЛЬТОВЫХ ПРАВОСЛАВНЫХ СООРУЖЕНИЯХ	135	Гарькин И.Н. РЕСТАВРАЦИОННО- РЕКОНСТРУКЦИОННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ	224
Столяров Д.В., Королева Т.И., Суровицкая Г.В. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ МЕТАНОВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ В ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ	146		
Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Курносое Н.Е., Алексеев Д.П. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАБОТЫ НАПОРНОГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО САТУРАТОРА	154		

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	Koryagin S.I., Sharkov O.V., Velikanov N.L. APPLICATION OF OVERLAY PLATES ON RIVETS IN REPAIR OF BUILDING STRUCTURES.....	97
Korolev E.V., Grishina A.N., Danilov A.M., Aizenshtadt A.M. STRUCTURAL EQUATION OF STRENGTH OF COMPOSITE MATERIALS	5	Bedov A.I., Laskov N.N., Gabitov A.I., Nedoseko I.V., Salov A.S. EFFECTIVE METHODS OF RESTORATION AND REINFORCEMENT OF FOUNDATIONS.....	102
Dergunova E.S., Goncharova M.A., Erofeev V.T. COMPREHENSIVE STUDY OF THE ENDURANCE OF CONCRETES MODIFIED WITH BIO-ADMIXTURES.....	20	Ayzatullin M.M., Ziyatdinov S.B., Sabitov L.S., Garkina I.A. CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF CONJUGATION NODES COMBINED GANTRY SUPPORTS.....	111
Idrisov I.Kh., Boldyrev G.G., Makridin N.I., Maksimova I.N. TESTING OF CLAY-SLAG COMPOSITES UNDER CONDITIONS OF SINGLE-PLANE SHEAR AND THREE-AXIS COMPRESSION.....	26	Titova E.I., Akimova I.V. DIGITAL TWINS IN CONSTRUCTION	121
Abdrakhimov V.Z. THE EFFECT OF PHOSPHOROUS SLAG ON THE POROSITY OF CLINKER BRICKS BASED ON NON-FERROUS METALLURGY WASTE.....	43	ENGINEERING SYSTEMS.....	126
Tarakanov O.V., Ivaschenko Yu.G., Erofeeva I.V. EXPANSION OF THE BASE OF MINERAL ADDITIVES FOR NEW GENERATION CONCRETE.....	54	Bodrov M. V., Ruin A.E., Smykov A.A. EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT FLOW DENSITY OF WATER INFRARED RADIATORS	126
Loganina V.I., Pylaev V.S., Filinova M.I. CRACK RESISTANCE OF LIME COATINGS WITH POLYSACCHARIDES ADDITIVES....	65	Eremkin A.I., Ponomareva I.K., Chudaykina T.N., Mishin A.A. TECHNICAL DEVICES FOR POLLUTION LOCALIZATION IN ORTHODOX CULT BUILDINGS.....	135
Kuzina V.V., Ryzhov A.D., Varentsov V.K., Koshev A.N. THE CHANGE OF SPECIFIC REACTION SURFACE OF CARBON GRAPHITE FIBER ELECTRODE AT GALVANIC METALLIZATION	73	Stolyarov D.V., Koroleva T.I., Surovitskaya G.V. NUMERICAL SIMULATION OF THE COMBUSTION PROCESS OF METHANE-HYDROGEN FUEL MIXTURES IN HEAT GENERATING PLANTS	146
Shapovalova A.V., Ageeva M.S., Klyuev S.V., Klyuev A.V. FINE-GROUND ADDITIVES FOR CONCRETE MIXTURE BASED ON TECHNOGENIC FIBROUS MATERIAL AND NANOASH	78	Andreev S.Yu., Safronov M.A., Kurnosov N.E., Alekseev D.P. EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PRESSURE PNEUMATIC SATURATOR OPERATION PROCESS	154
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.....	87	Frolov M.V., Kurdin A.V. ASSESSMENT OF HEAT LOSS THROUGH EXTERNAL ENCLOSING STRUCTURES OF HEATED BASEMENTS.....	163
Shein A.I., Bykov A.N. THE CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF DAMPING VIBRATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES	87	Mironov V.V., Erofeev E.A., Ivanyushin Yu.A., Mironov D.V., Stepanov O.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING HOT WATER AND ICE USING THE ENERGY OF SEA WAVES	172

Khomutov A.O., Usachev A.P., Rulev A.V. DEVELOPMENT OF A METHOD AND MATHEMATICAL MODEL FOR ELIMINATION OF DEPOSITS OF MECHANICAL IMPURITIES BETWEEN PRELIMINARY AND FINE FILTER CARTRIDGES 181	Lapshina E.G., Dimakov N.D. WOODEN HIGH-RISE ARCHITECTURE: TOWERS..... 199
ARCHITECTURE..... 190	Beregovoy A.M. APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF HEAT LOSSES AND RADON SAFETY OF UNDERGROUND RESIDENTIAL BUILDINGS–EARTH SCRAPERS 209
Grechishkin A.V., Andrianov K.A., Ledenev V.I., Matveeva I.V. ARCHITECTURE AND STRUCTURES OF THE CHURCH OF THE RESURRECTION OF CHRIST THE SAVIOR IN THE VILLAGE KRASNOE ZNAMYA, TAMBOV REGION 191	Gladysheva M.V., Cherushova N.V. THE METHOD OF IMITATION IN POSTMODERNIST ARCHITECTURE..... 216
	Garkin I.N. RESTORATION AND RECONSTRUCTION TRANSFORMATION OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS OF THE URBAN ENVIRONMENT: MODERN APPROACHES AND CLASSIFICATION 224

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691:539.42

DOI 10.54734/20722958_2025_3_5

*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 деятельности,
зав. кафедрой «Технология строительных
материалов и метрология»
E-mail: prorector_nr@spbgasu.ru

Гришина Анна Николаевна,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник кафедры
«Технология строительных материалов
и метрология»
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 материаловедения,
реставрации и экологии в строительстве
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: prorector_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
Materials Science, Restoration and Ecology in
Construction
E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

СТРУКТУРНОЕ УРАВНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Проведён анализ терминов «прочность» и «разрушение». Показано сопряжение указанных терминов, и предложены элементы системы «состояние материала». Выведено структурное уравнение прочности, объединяющее представления о трещинообразовании как о процессе разрушения и как о процессе формирования геометрического объекта – системы трещин. Отмечено, что процесс разрушения является антиперсистентным, т.е. существуют соотношения параметров структурного уравнения прочности, при которых прочность на характерной ветви может изменять тренд на противоположный. Предложена классификация структуры материала по величине фрактальной размерности системы трещин, включающая 7 типов структуры.

Ключевые слова: прочность, разрушение, показатель Хёрста, композиционные материалы, фрактальная размерность, трещины, структурообразование, теория протекания

STRUCTURAL EQUATION OF STRENGTH OF COMPOSITE MATERIALS

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

The article analyzes the terms «strength» and «fracture». The conjugation of these terms is shown and the elements of the «material condition» system are proposed. A structural strength equation is proposed that combines the idea of cracking as a fracture process and the formation of a geometric object – a system of cracks. It is shown that the fracture process is antipersistent, that is, there are ratios of the parameters of the structural strength equation in which the strength on a characteristic branch can reverse the trend. A classification of the material structure according to the fractal dimension of the crack system, including 7 types of structure, is proposed.

Keywords: strength, fracture, Hurst index, composite materials, fractal dimension, cracks, structure formation, theory of leakage

Введение. Прочность материалов является объектом пристального внимания не только в научных исследованиях и инженерии, но и в повседневной жизни. Для одних специалистов она является характеристикой надёжности конструкций, а для других – показателем качества сформировавшейся структуры материала. Прочность материала неразрывно связана с его разрушением. Для достижения полного целостного представления о прочности материала важно выделить основные элементы и взаимосвязи между понятиями «прочность» и «разрушение».

Часто под прочностью [1] понимают способность материала сопротивляться внешним нагрузкам, вызывающим необратимое изменение формы и разрушение, которое является необратимым процессом потери сцепления между частицами материала, что приводит к появлению и развитию в его объёме поверхностей, приводящих к разделению первоначально целого объекта на части [2]. Также под прочностью понимают свойство сохранять на протяжении определённого времени сплошность, целостность, конфигурацию, размеры, способность к упругой деформации под действием внешних нагрузок различной природы (механических, термических, электрических, магнитных и др.) [3].

Отсюда очевидно, что прочность является свойством, характеризующим *состояние* объекта (образца, конструкции), разделённого на части (рис. 1). Для достижения этого состояния, которому предшествуют эволюционные преобразования состояний материала кроме эксплуатационных воздействий необходимо время. Очевидно, что до достижения этого состояния *нет возможности* определить прочность материала. Не детализируя механизмы разрушения, описанные в многочисленных источниках научно-технической информации [4], отметим, что общая эволюция разрушения материала как многоэтапного и иерархичного процесса состоит из последовательности, каждый элемент которой имеет собственную энергию активации: точечный дефект → ли-

нейный дефект → объёмный дефект → микротрещина → макротрещина → магистральная трещина. Причём важно отметить, что элементы процесса разрушения начального уровня (точечный дефект → линейный дефект → объёмный дефект) реализуются на этапах трещинообразования, а микро- и макротрещины – на этапе магистральной трещины, разделяющей объект на части. Соотношение микро- и макротрещин в материале может быть различным. Так, в [4, 5] показано, что под нагрузкой в материале может образовываться много микротрещин, которые после появления могут и не расти длительное время.



Рис. 1. Взаимосвязь понятий «разрушение» и «прочность» материалов

Из изложенного можно заключить, что основными элементами, с привлечением которых можно оценить *состояние материала*, являются:

- вид и концентрация *связей* между структурными элементами материала;
- вид и концентрация *дефектов* структуры;
- вид и количество *трещин*.

В ГОСТ 15467-79 дефект определён как «каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям». Очевидно, что такая интерпретация дефекта мало пригодна для рассматриваемой задачи. Также не в полной мере могут быть применены другие термины, например «дефекты в кристаллах» или близкие определения. Для цели рассматриваемой проблемы дефект структуры целесообразно определить как *область пространства в структуре материала, в которой отсутствуют связи между структурными элементами*. Исходя из представленного определения, трещины могут быть идентифицированы как частный вид дефектов, который, однако, является «продуктом» разрушения.

Образование трещин и их объединение в систему трещин с позиции физики открытых систем [6] – это процесс формирования новой структуры вследствие подвода к материалу внешней энергии. Естественно, процесс формирования новой структуры – трещин и системы трещин – должен являться энергетически выгодным. Сделаем следующее предположение: *формирование системы трещин, возникающих вследствие перехода «напряжённые связи – разорванные связи», является энергетически выгодным процессом*.

Для подтверждения этого предположения рассмотрим материал, находящийся в двух состояниях:

- *Состояние 1* – в материале действуют силы, формирующие внутреннее напряжённое состояние. Рассматриваемые внутренние напряжения появляются как в результате внешних нагрузок, так и вследствие геометрической несбалансированности, возникающей при структурообразовании материала [7].
- *Состояние 2* – материал, в котором внутренние напряжения привели к образованию трещин. Все трещины материала формируют в нём систему трещин. При этом трещины могут быть и не взаимосвязаны между собой.

Введём некоторые допущения, которые сужают вариативность рассматриваемого решения:

- 1) материал является изотропным, его химический состав однороден;
- 2) взаимодействие между атомами вещества описывается силой взаимодействия, полученной из потенциала Леннарда – Джонса [8]:

$$f(r) = \frac{12u_0}{r_0} \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{13} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^7 \right],$$

где u_0 и r_0 – координаты минимума потенциальной энергии на зависимости $u_0 = f(r)$; u_0 – энергия связи ($u_0 = U_0 / N_A$; здесь U_0 – энергия связи структурных единиц, например атомов, Дж/моль; N_A – постоянная Авогадро); r_0 – длина связи при $U = U_0$;

3) трещины образуются в зонах локализации внутренних напряжений в результате перехода «напряжённые связи – разорванные связи». Площадь трещин S_{cr} и площадь зон, в которых локализованы внутренние напряжения, равны.

Энергетическое условие образования трещины приводит к минимизации напряжений и изменению внутреннего напряжённого состояния. Это условие можно представить в виде:

$$E_f > E_s,$$

где E_f – потенциальная энергия материала с внутренними напряжениями; E_s – поверхностная энергия трещин в материале.

Поверхностная энергия трещин с общей площадью S_{cr} равна:

$$E_s = \sigma S_{cr},$$

где σ – поверхностная энергия образования новой поверхности.

Потенциальная энергия материала с внутренними напряжениями будет зависеть от силы, которая приводит к удлинению связи:

$$\Delta f = f(r^*) - f(r_0),$$

от величины удлинения связи:

$$\Delta r = r^* - r_0$$

и от количества связей N_f , локализованных в зонах внутренних напряжений.

Количество связей N_f можно вычислить по формуле

$$N_f = S_{cr} / s_0,$$

где s_0 – средняя площадь, приходящаяся на одну связь,

$$s_0 = \left(\frac{M}{\rho_0 N_A} \right)^{2/3};$$

здесь M – молярная масса вещества материала; ρ_0 – плотность материала.

Обобщив все представленные формулы, получим формулу для вычисления потенциальной энергии материала с внутренними напряжениями:

$$E_f = \Delta f \Delta r S_{cr} \left(\frac{M}{\rho_0 N_A} \right)^{-2/3}.$$

При введении замены:

$$r^* = k_f r_0$$

(здесь $k_f > 0$ – коэффициент, характеризующий длину связи при приложении к ней растягивающей силы) и условии

$$f(r_0) = 0$$

формулу для вычисления потенциальной энергии материала с внутренними напряжениями можно преобразовать к окончательному виду:

$$E_f = 12u_0 (k_f - 1) \left[\left(\frac{1}{k_f} \right)^{13} - \left(\frac{1}{k_f} \right)^7 \right] S_{cr} \left(\frac{M}{\rho_0 N_A} \right)^{-2/3}.$$

Максимальная величина коэффициента k_f согласно [8] равна $k_{f,\max} = 1,109$. При этой величине коэффициента k_f растянутая на 10,9 % связь разрывается.

С учётом полученных формул для E_f и E_s общее условие энергетической эффективности преобразуем к виду:

$$(k_f - 1) \left[\left(\frac{1}{k_f} \right)^{13} - \left(\frac{1}{k_f} \right)^7 \right] > \frac{\sigma}{12u_0} \left(\frac{M}{\rho_0 N_A} \right)^{2/3}.$$

Подробно рассмотрим условие, при котором величина напряжений, приводящих к деформациям связей, равна σ (здесь σ представляется как сила из закона Юнга). В этом случае при $k_f = k_{f,\sigma}$ выполняется условие равенства энергий $E_f = E_s$, то есть

$$(k_{f,\sigma} - 1) \left[\left(\frac{1}{k_{f,\sigma}} \right)^{13} - \left(\frac{1}{k_{f,\sigma}} \right)^7 \right] = \frac{\sigma}{12u_0} \left(\frac{M}{\rho_0 N_A} \right)^{2/3}.$$

Отсюда условие энергетической эффективности можно представить в виде:

$$(k_f - 1) \left[\left(\frac{1}{k_f} \right)^{13} - \left(\frac{1}{k_f} \right)^7 \right] > (k_{f,\sigma} - 1) \left[\left(\frac{1}{k_{f,\sigma}} \right)^{13} - \left(\frac{1}{k_{f,\sigma}} \right)^7 \right].$$

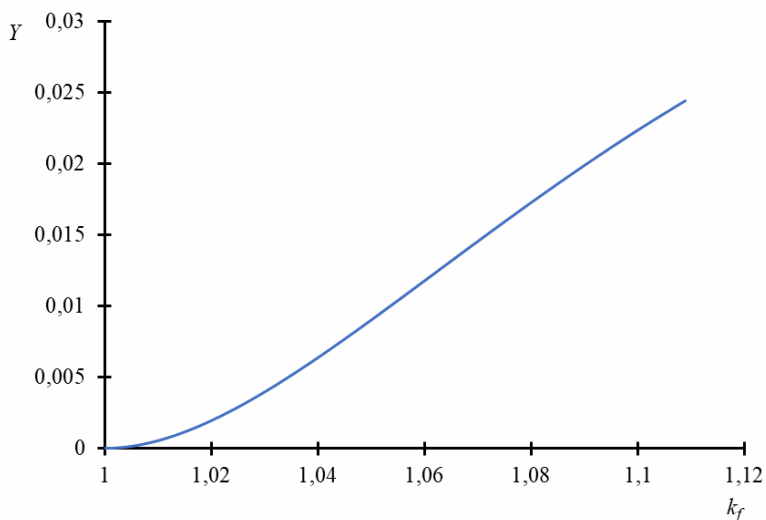
Для исследуемого энергетического условия достаточно показать, что при любых величинах коэффициента k_f , находящихся в диапазоне

$$k_{f,\sigma} < k_f \leq k_{f,\max},$$

условие энергетической эффективности выполняется (рис. 2).

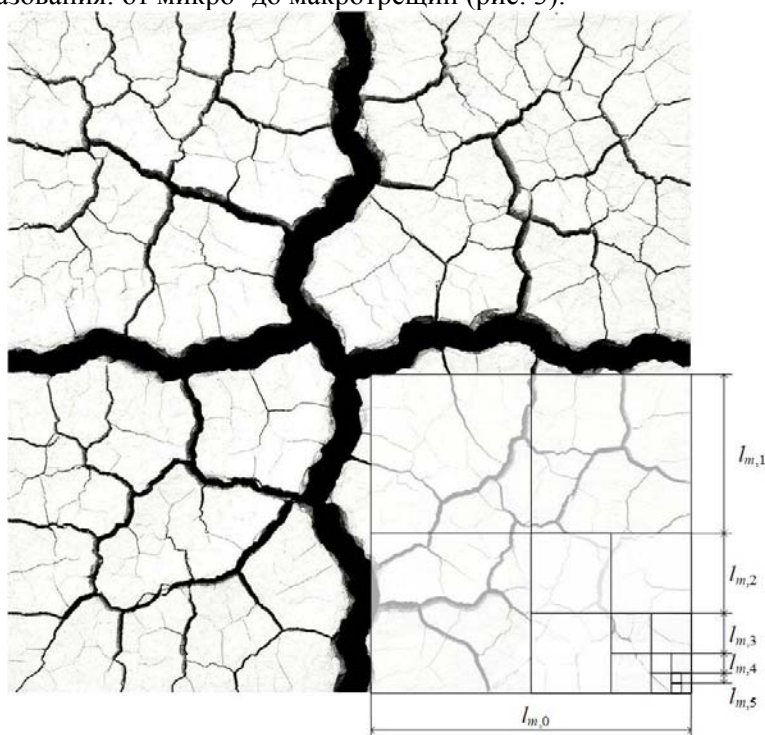
Данные рис. 2 убедительно доказывают, что если в материале возникают внутренние напряжения, величина которых больше σ , то образование системы трещин в результате перехода «напряжённые связи – разорванные связи» является энергетически выгодным процессом.

При разрушении между структурными связями и дефектами существует естественная взаимосвязь: разрыв связей в локальной области материала приводит к формированию дефекта (трещины), развитие дефекта (трещины) также происходит вследствие разрыва новых связей. При этом при росте трещин могут поглощаться различные другие дефекты. Такое рассмотрение позволяет использовать для оценки прочности (разрушения) различные сочетания элементов, характеризующих состояние материала.

Рис. 2. Зависимость $Y = f(k_f)$

$$\left(\text{здесь } Y = (k_f - 1) \left[\left(\frac{1}{k_f} \right)^{13} - \left(\frac{1}{k_f} \right)^7 \right] \right)$$

В данной работе для описания состояния материала будем использовать следующие элементы: *дефекты структуры* и *трещины*. Разномасштабные трещины в материале формируют систему трещин, для описания которой удобно использовать модель Шкловского – де Жена [9]. Важной особенностью этой модели является геометрическое самоподобие, которое весьма хорошо соответствует геометрии трещинообразования: от микро- до макротрещин (рис. 3).



$$l_{m,0} > l_{m,1} > l_{m,2} > l_{m,3} > l_{m,4} > l_{m,5} > \dots > l_{m,n}$$

Рис. 3. Модель Шкловского – де Жена для трещин в материале
(рисунок сгенерирован нейросетью YandexART v.2.5 на основе промта,
подготовленного авторами)

Основными компонентами модели Шкловского – де Жена являются *ребра сети*, соответствующие трещинам, образующим *замкнутые ячейки* различного размера $l_{m,i}$ (на рис. 3 упрощённо представлено в виде квадратов с соответствующим размером грани). Все эти ячейки образуют разномасштабную сеть, которая идентична системе трещин. Кроме ячеек дополнительными элементами модели являются *тупиковые элементы*, т.е. трещины, не образующие ячеек, но вносящие вклад в общую длину трещин.

Сеть модели Шкловского – де Жена (система трещин) и её компоненты извилисты и геометрически самоподобны, что предполагает наличие у такой системы дробной (фрактальной) размерности [9]. Величину фрактальной размерности D вычисляют по формуле [10-15], устанавливающей зависимость количества элементов $N(\varepsilon)$, необходимых для покрытия рёбер сети, от размера этих элементов ε :

$$D = \frac{\ln(N(\varepsilon))}{\ln(\varepsilon)}.$$

Из представленного описания модели Шкловского – де Жена можно предположить, что с уменьшением размера ячейки l_m (то есть увеличения длины трещин) прочность материала должна возрастать, то есть

$$R_c \propto l_m^{-1}.$$

Формирование сети трещин является в общем случае случайным процессом, для которого имеются общие принципы:

1. *Принцип минимальности энергозатрат* на образование и рост трещин, заключающийся в следующем. При прочих равных условиях (вид материала и параметры его структуры) образование и рост трещин происходят между дефектами, наиболее близко расположенными так, чтобы площадь элементарных площадок трещин была минимальной $s_{e,cr} = \min$ или $s_{e,cr} \gamma = \min$ (здесь γ – поверхностная энергия).

2. *Принцип универсальности*, заключающийся в том, что образование элементарных площадок трещин может происходить при достижении соответствующих условий произвольно в любом объёме материала.

3. *Принцип сохранности элементарных площадок трещин*, состоящий в том, что образовавшиеся элементарные площадки трещин не могут самоликвидироваться без изменения условий, приведших к их образованию.

4. *Принцип последовательности*, предполагающий, что рост трещин происходит последовательным объединением элементарных площадок.

Прочность материала R_c , содержащего дефекты, зависит от прочности единичной связи f_s и их количества N_s :

$$R_c \propto f_s N_{s,R}.$$

Ребиндером А.П. [16] показано, что прочность гомогенного материала можно представить в виде:

$$R_c = \mathcal{V} f_s N_{s,R}^{2/3}.$$

Количество связей $N_{s,R}$, воспринимающих эксплуатационные нагрузки, с учётом количества связей N_p , удалённых из материала из-за дефектов, будет равно:

$$N_{s,R} = N_{s,0} - N_p = N_{s,0} \left(1 - \frac{N_p}{N_{s,0}} \right),$$

где $N_{s,0}$ – количество связей в бездефектном материале.

Количество связей сопряжено с количеством узлов N_u и координационным числом связей z :

$$N_{s,i} = zN_{u,i} = z \frac{V_i}{V_u},$$

где V_u – условный объём узла.

С учётом последней формулы количество связей $N_{s,R}$, воспринимающих эксплуатационные нагрузки, преобразуется к виду:

$$N_{s,R} = N_{s,0} \left(1 - \frac{V_p}{V_0} \right).$$

Отсюда формулу Ребиндера А.П. можно преобразовать к виду:

$$R_c = \gamma_s^f \left[N_{s,0} \left(1 - \frac{V_p}{V_0} \right) \right]^{2/3} = R_0 (1 - v_p)^{2/3},$$

где $R_0 = \gamma_s^f N_{s,0}^{2/3}$ – прочность бездефектного материала; $v_p = V_p / V_0$ – объёмная концентрация дефектов.

Показатель степени формулы Ребиндера П.А. получен из естественных геометрических представлений о распределении связей в пространстве, а именно: количество связей в любом из направлений в пространстве равно $N_{s,R}^{1/3}$, а их количество в любой плоскости – $N_{s,R}^{2/3}$. Очевидно, что такой подход не учитывает фрактальную природу системы трещин, поэтому с учётом указанного прочность материала с дефектами можно представить в виде:

$$R_c = R_0 (1 - v_p)^{Q_{cr}},$$

где Q_{cr} – показатель степени, учитывающий фрактальную природу системы трещин.

Величина Q_{cr} связана с моделью Шкловского – де Жена следующим образом. Очевидно, что формирование системы трещин (сетки в модели Шкловского – де Жена) протекает во времени и имеет случайные направления. Этот процесс идентичен процессу случайного блуждания, в котором пройденное расстояние пропорционально продолжительности процесса [16]:

$$\sum r_i \propto t^H,$$

где t – время; H – показатель Хёрста.

Это блуждание происходит в некотором объёме, который можно представить в виде:

$$V_i = l_m^{D_i},$$

где $l_m = kr_i$ – размер пространственной фигуры, в которой происходит блуждание; D_i – внутренняя размерность.

Очевидно, что с увеличением времени объём V_i будет возрастать; поэтому между D_i и показателем Хёрста существует зависимость, выраженная формулой [16]:

$$D_i = \frac{1}{H}.$$

С другой стороны, систему трещин можно рассмотреть как геометрический объект, размерность которого может быть представлена следующим образом [16]:

$$\sum r_i \propto \varepsilon^H,$$

где ε – линейная мера по Хаусдорфу.

Показатель Хёрста связан с фрактальной размерностью Хаусдорфа – Безиковича в пространстве следующим образом:

$$D_e = 3 - 2H,$$

где D_e – фрактальная размерность объекта.

Показатель Хёрста характеризует тенденцию в протекании процесса, свойственную для рассматриваемого периода времени. Выделяют *антиперсистентный процесс*, для которого показатель Хёрста $H < 0,5$, и *персистентный процесс* с $H > 0,5$. В отличие от персистентного процесса антиперсистентный процесс характеризуется последовательными разнонаправленно изменяющимися тенденциями [17, 18]. В рамках рассматриваемой задачи разрушения это означает, что образование и рост трещин (тенденция 1) сменяются на остановку их развития (тенденция 2).

Представленные способы описания одного и того же объекта – системы трещин – и как процесса, протекающего во времени, и как геометрического объекта позволяют рассматривать разрушение как процесс, протекающий во времени одновременно с формированием структуры, имеющей фрактальную размерность. Отсюда можно провести идентификацию размерностей, применяемых в указанных описаниях. Очевидно, что величина D_e , используемая при геометрическом представлении системы трещин, соответствует её фрактальной размерности D_{cr} . Величина D_i , использованная для описания процесса разрушения, а следовательно, и определения прочности соответствует Q_{cr} . Для этих способов описания инвариантом является показатель Хёрста. В этой связи показатель степени Q_{cr} будет равен:

$$Q_{cr} = \frac{2}{3 - D_{cr}},$$

а формула прочности материала с дефектами в виде:

$$R_c = R_0 (1 - v_p)^{\frac{2}{3 - D_{cr}}}.$$

Оценка критического содержания дефектов. Для этого рассмотрим механизм направленного протекания. Из ранее представленных принципов образования и развития элементарных площадок трещин следует, что рост трещины – это последовательный процесс, который может быть представлен как продвижение фронта возбуждения от узла к узлу. Если предположить, что в момент времени t количество возбуждённых узлов равно $N_{u,a}$, то в момент времени $(t + 1)$ их количество будет равно:

$$N_{u,a}(t + 1) = zN_{u,a}(t)$$

или

$$\varphi_{t+1} = z\varphi_t,$$

где $\varphi_i = N_{u,a}(i) / N_u$ – доля возбуждённых узлов.

Любой выбранный узел может находиться в возбуждённом состоянии с вероятностью, равной:

$$1 - (1 - p)^{z\varphi_t}.$$

Так как передача возбуждения происходит к узлам, находящимся рядом с активными узлами, то вероятность нахождения узла в возбуждённом состоянии равна доле возбуждённых узлов в момент $(t + 1)$, то есть

$$\Phi_{t+1} = 1 - (1 - p)^{z\Phi_t}.$$

Отсюда следует, что при каждом $z = z_i$ существует такое значение $p_z = p_{c,z}$, при котором выполняется равенство

$$\frac{\Phi_{t+1}}{\Phi_t} = 1,$$

то есть имеется некоторая стационарная точка, местоположение которой зависит от значения Φ_t . Очевидно, что при $p_z < p_{c,z}$ доля возбуждённых узлов уменьшается $\Phi_{t+1} < \Phi_t$ и при $t \rightarrow \infty$ доля возбуждённых узлов будет равна нулю. При $p_z > p_{c,z}$ наблюдается возрастание доли возбуждённых узлов $\Phi_{t+1} > \Phi_t$. Величина $p_{c,z}$ зависит от координационного числа и может быть вычислена по формуле

$$p_c = 1 - \exp\left(-\frac{1}{z}\right).$$

С величиной p_c связаны также другие важные характеристики перколяционных структур (кластеров) [10]:

- средний размер кластера (корреляционная длина): $l_c \sim |p - p_c|^{-\nu}$;
- среднее количество узлов кластера: $N_c \sim |p - p_c|^{-\gamma}$;
- параметр порядка: $q \sim (p - p_c)^\beta$,

где ν – критический индекс радиуса корреляции ($\nu = 0,875 \pm 0,008$); β – критический индекс порядка ($\beta = 0,417 \pm 0,003$); γ – критический индекс среднего числа узлов в кластере ($\gamma = 1,795 \pm 0,005$).

Эти индексы не зависят от структурных особенностей решёток и типа протекания, но позволяют определить размерность перколяционного кластера [11]:

$$D_{H,c} = 3 - \frac{\beta}{\nu} = 2,54 \pm 0,008.$$

Формирование перколяционного кластера трещин $D_{cr,c} = D_{H,c}$ можно идентифицировать как событие разделения образца материала на части. Полученные формулы позволяют определить величину относительной прочности в зависимости от координационного числа дефектов z (рис. 4).

Полученные данные демонстрируют, что качество возбуждённых дефектов (узлов сети), которое можно соотнести с количеством связей z , способных к передаче возбуждения (развитие трещины), является ключевым фактором. С увеличением z количество дефектов, которые необходимо задействовать для формирования перколяционной системы трещин, имеющей размерность, равную $D_{cr} = D_{cr,c}$, достаточно быстро убывает. Так, для дефектов с $z = 2$ доля дефектов, участвующих в образовании трещин, равна 39,3 %, а при координационном числе $z = 10$ – только 9,5 %. При этом уменьшение доли дефектов, участвующих в трещинообразовании и формирующих перколяционную систему трещин, естественно приводит к увеличению относительной прочности материала.

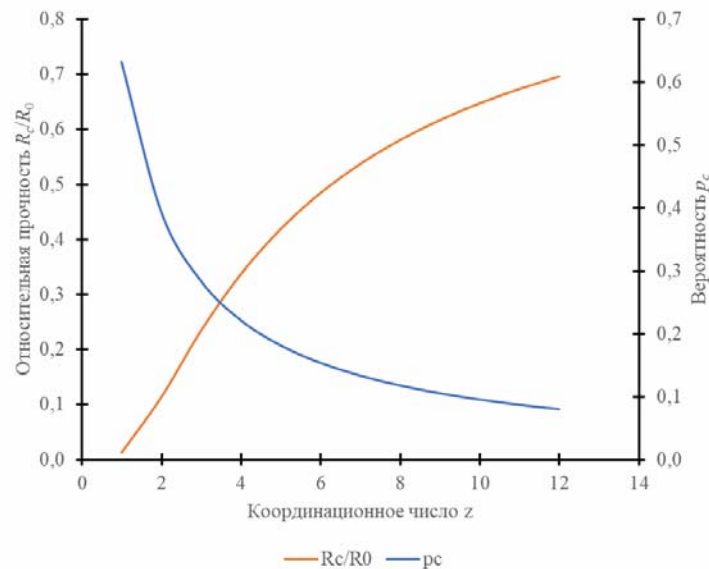


Рис. 4. Зависимости относительной прочности (R_c / R_0) и критического содержания дефектов (p_c) для формирования перколяционной системы трещин от координационного числа z

Анализ структурного уравнения прочности. Дополнительный анализ представленного уравнения прочности показывает наличие причинно-следственной связи между концентрацией дефектов v_p и фрактальной размерностью системы трещин D_{cr} . Эту связь можно представить следующим образом. В образовании и развитии трещин участвуют дефекты, которые *расходятся* на эти процессы. Развитие трещин происходит посредством образования микротрещин и их слияния в более крупные, что приводит как к разнообразию размеров трещин, так и вариации их количества. В результате увеличивается «шероховатость» системы трещин, что характеризуется *ростом* величины фрактальной размерности. Эта взаимосвязь характерна для восходящей ветви зависимости прочности от исследуемого фактора.

Для нисходящей ветви прочности характерно объединение трещин, что неизбежно ведёт к их раскрытию, что сопровождается увеличением v_p , а увеличение плотности трещин – к снижению величины D_{cr} вследствие их массового объединения. Эти сценарии развития (теоретически можно сформулировать 9 сценариев) демонстрируют, что потенциал структуры материала P_R , характеризующийся величиной R_c / R_0 , возрастает с увеличением суммы приращений фрактальной размерности системы трещин ΔD_{cr} и объёмной концентрации дефектов Δv_p :

$$P_R = \sqrt{\Delta D_{cr}^2 + \Delta v_p^2}.$$

Представленное соотношение справедливо как для восходящей, так и для нисходящей ветви прочности (рис. 5).

Величины приведённой прочности, представленные на рис. 5, рассчитаны следующим образом:

$$r_c = \frac{(R / R_0)_i}{(R / R_0)_0}.$$

Для восходящей ветви прочности $r_c > 1$, а для нисходящей ветви прочности – $r_c < 1$.

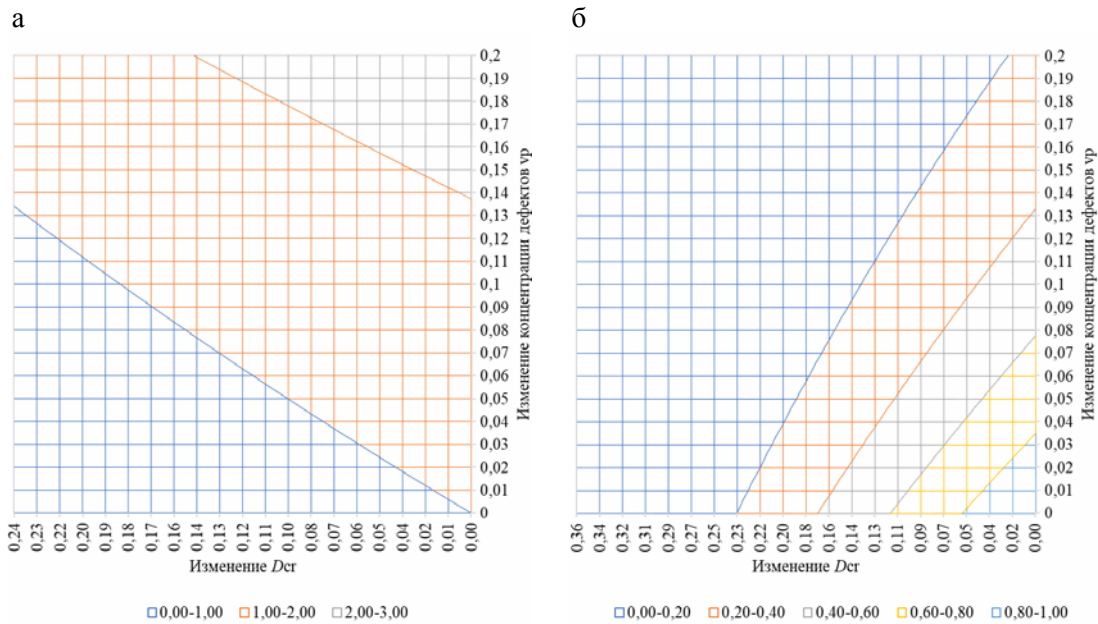


Рис. 5. Зависимость приведённой прочности r_c от диапазона изменения ΔD_{cr} и Δv_p :

а – для восходящей ветви прочности; б – для нисходящей ветви прочности

Однако не для всего диапазона изменения D_{cr} и v_p существуют соотношения D_{cr} и v_p , при которых прочность на характерной ветви может изменять тренд на противоположный. Очевидно, что наличие таких соотношений дополнительно подтверждает антиперсистентный характер прочности, а также объясняет возникновение статистических выбросов при проведении прочностных испытаний.

Определение типа структуры. Из общего определения фрактальной размерности следует, что её увеличение указывает на расширение диапазона размеров элементов объекта. Такая интерпретация позволяет провести классификацию структуры материала по величине D_{cr} . Для этого представим систему трещин, состоящую из двух типов структур: *однородной структуры*, для которой характерно развитие системы трещин с $D_{cr} \rightarrow 2$, и *неоднородной структуры*, которая состоит из трещин в широком диапазоне размеров, т.е. $D_{cr} \rightarrow 3$. Соотношение этих типов структур равно коэффициенту однородности структуры:

$$K_{HS} = \frac{3 - D_{cr}}{D_{cr} - 2}.$$

В зависимости от величины K_{HS} можно выделить 7 типов структур материала (см. таблицу).

Интервалы D_{cr} , относительное содержание и типы структур материала

Интервал D_{cr}		Интервал изменения однородной структуры		Интервал изменения неоднородной структуры		Тип структуры
$D_{cr, \min}$	$D_{cr, \max}$	min	max	min	max	
1	2	3	4	5	6	7
2,00	2,07	93 %	100 %	0 %	7 %	Структурно-однородная
2,07	2,26	74 %	93 %	7 %	26 %	Структурно-квазиоднородная

1	2	3	4	5	6	7
2,26	2,51	49 %	74 %	26 %	51 %	Композиционная структурно-однородная
2,51	2,71	29 %	49 %	51 %	71 %	Композиционная типичная
2,71	2,84	16 %	29 %	71 %	84 %	Композиционная квазиоднородная
2,84	2,92	8 %	16 %	84 %	92 %	Структурно-квазиоднородная
2,92	3,00	8 %	100 %	0 %	92 %	Структурно-неоднородная

Представленные в таблице данные демонстрируют, что материал, в котором при разрушении сформировалась система трещин, соответствующая перколяционной системе трещин, т.е. при $D_{cr} = D_{cr,c}$, обладает типичной композиционной структурой. При уменьшении $D_{cr} < D_{cr,c}$ начинает преобладать однородная структура, обладающая трещинами с меньшим диапазоном размеров, а при увеличении $D_{cr} > D_{cr,c}$ – неоднородная структура материала.

Заключение. Таким образом, проведён анализ терминов «прочность» и «разрушение». Показано сопряжение указанных терминов, и предложены элементы системы «состояние материала». В данной работе для описания состояния материала, в котором протекает процесс разрушения, использованы параметры «концентрация дефектов структуры» и «вид и количество трещин». В рамках решаемой задачи дано уточнение термина «дефект».

Показано, что формирование системы трещин, возникающих вследствие перехода «напряжённые связи – разорванные связи», является энергетически выгодным процессом и приводит вследствие подвода к материалу внешней энергии к образованию новой структуры – системы трещин.

Предложено структурное уравнение прочности, объединяющее представления о трещинообразовании как о процессе разрушения и как о процессе формирования геометрического объекта – системы трещин. Для этого используется характеристика – фрактальная размерность системы трещин. Оценка величины показателя Хёрста указывает, что процесс разрушения является антиперсистентным процессом, для которого характерны последовательные разнонаправленно изменяющиеся тенденции.

Проведён анализ взаимосвязи между концентрацией дефектов и их координационным числом. Показано, что уменьшение доли дефектов, участвующих в трещинообразовании и формирующих перколяционную систему трещин, естественно приводит к увеличению относительной прочности материала. На основе универсальных индексов теории протекания определена фрактальная размерность системы трещин, соответствующая перколяционному кластеру трещин ($D_{H,c} = 2,54 \pm 0,008$), образование которого можно идентифицировать как событие разделения образца материала на части.

Выполнен анализ структурного уравнения прочности и показано, что его параметры – концентрация дефектов и фрактальная размерность системы трещин – позволяют провести оценку потенциала структуры материала P_R . Показано, что существуют соотношения параметров структурного уравнения прочности, при которых прочность на характерной ветви может изменять тренд на противоположный. Указанное дополнительно подтверждает антиперсистентный характер прочности, а также

объясняет возникновение статистических выбросов при проведении прочностных испытаний. На основе фрактальной размерности системы трещин предложена классификация структуры материала, включающая 7 типов структуры.

Список литературы

1. Большой энциклопедический словарь / под ред. А.М. Прохорова. – Москва : Советская энциклопедия, Санкт-Петербург : фонд «Ленинградская галерея», 1993. – 1628 с.
2. Терауд, В.В. Разрушение / В.В. Терауд // Большая российская энциклопедия. – 2016. – URL: <https://old.bigenc.ru/physics/text/3490933>. – Дата обращения : 28.05.2025.
3. Король, Е.З. Прочность твёрдого тела / Е.З. Король // Большая российская энциклопедия : научно-образовательный портал. – URL: <https://bigenc.ru/c/prochnost-tviordogo-tela-7f8d47/?v=6366936>. – Дата обращения : 21.02.2023
4. Кольский, Г. Волны напряжений и разрушение / Г. Кольский, Д. Рейдер // Разрушение. Том 1. – Москва : Мир, 1973. – 616 с.
5. Друккер, Д. Макроскопические основы теории хрупкого разрушения / Д. Друккер // Разрушение. Том 1. – Москва : Мир, 1973. – 616 с.
6. Климонтович, Ю.Л. Введение в физику открытых систем / Ю.Л. Климонтович. – Москва : Янус-К, 2002. – 284 с.
7. Королев, Е.В. Оценка структурных эффектов от образования плёночной фазы матричного материала / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Данилов, А.М. Айзенштадт // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 1 (62). – С. 21–34.
8. Кривцов, А.М. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела / А.М. Кривцов, Н.В. Кривцова // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. – 2002. – №2. – С. 254–276.
9. Бобрышев, А.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композиционных систем / А.Н. Бобрышев, В.Т. Ерофеев, В.Н. Козомазов – Санкт-Петербург : Наука, 2012. – 476 с.
10. Федер, Энс. Фракталы / Энс Федер – Москва : УРСС : Ленанд., 2014. – 264 с.
11. Иудин, Д.И. Фракталы: от простого к сложному / Д.И. Иудин, Е.В. Копосов. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2012. – 200 с.
12. Розенберг, Г.С. Фрактальные методы анализа структуры сообществ / Г.С. Розенберг // Принципы экологии. – 2018. – №4. – С. 4–43.
13. Пайтген, Х.О. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем / Х.О. Пайтген, П.Х. Рихтер. – Москва : Мир, 1993. – 176 с.
14. Иванова, В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. – Москва : Наука, 1994. – 383 с.
15. Иванова, В.С. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов / В.С. Иванова, М.М. Закирничная, И.Р. Кузеев. – Уфа : Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 1998. – Ч. 1. – 144 с.
16. Физико-химическая механика дисперсных структур / под ред. П.А. Ребиндера. – Москва : Наука, 1966. – 400 с.
17. Калущ, Ю.А. Показатель Хёрста и его скрытые свойства / Ю.А. Калущ, В.М. Логинов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2002. – Т. V, № 4(12). – С. 29–37.
18. Holden, J.G. Fractal analyses: statistical and methodological innovations and best practices / J.G. Holden, M.A. Riley, J. Gao, K. Torre // Frontiers of Physiology. – 2013. – № 5. – P. 97.

References

1. A large encyclopedic dictionary / Edited by A.M. Prokhorova. – Moscow : Soviet Encyclopedia, St. Petersburg : foundation «Leningrad Gallery», 1993. – 1628 p.
2. Teraud, V.V. Destruction / V.V. Teraud // Great Russian Encyclopedia. – 2016. – URL: <https://old.bigenc.ru/physics/text/3490933>. – Date of conversion : 05/28/2025.

3. Korol, E.Z. Strength of a solid body / E.Z. Korol // Great Russian Encyclopedia: scientific and educational portal – URL: <https://bigenc.ru/c/prochnost-tviordogo-tela-7f8d47/?v=6366936>. – Date of request : 02/21/2023.
4. Kolsky, G. Stress waves and destruction / G. Kolsky, D. Rayder // Destruction. Volume 1. – Moscow : Mir Publ., 1973. – 616 p.
5. Drukker, D. Macroscopic foundations of the theory of brittle fracture / D. Drukker // Destruction. Volume 1. – Moscow : Mir, 1973. – 616 p.
6. Klimontovich, Yu.L. Introduction to the physics of open systems / Yu.L. Klimontovich. – Moscow :Janus-K, 2002. – 284 p.
7. Korolev, E.V. Evaluation of the structural effects of the formation of the film phase of the matrix material / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Danilov, A.M. Aisenstadt // Regional architecture and engineering. – 2025. – No 1 (62). – P. 21–34.
8. Krivtsov, A.M. The particle method and its use in deformable solid mechanics / A.M. Krivtsov, N.V. Krivtsova // Far Eastern Mathematical Journal FEB RAS. – 2002. – No 2. – P. 254–276.
9. Bobryshev, A.N. Physics and synergetics of dispersed disordered condensed composite systems / A.N. Bobryshev, V.T. Yerofeev, V.N. Kozomazov – St. Petersburg : Nauka, 2012. – 476 p.
10. Feder, E. Fractals / Jens Feder. – Moscow : URSS : Lenand, 2014. – 264 p.
11. Yudin, D.I. Fractals: from simple to complex / D.I. Yudin, E.V. Koposov. – N. Novgorod : NGASU, 2012. – 200 p.
12. Rosenberg, G.S. Fractal methods for analyzing the structure of communities / G.S. Rosenberg // Principles of Ecology. – 2018. – No. 4. – P. 4–43.
13. Paitgen, H.O. The beauty of fractals. Images of complex dynamic systems / H.O. Paitgen, P.H. Richter – Moscow : Mir, 1993. – 176 p.
14. Ivanova, V.S. Synergetics and fractals in materials science / V.S. Ivanova, A.S. Balankin, I.Zh. Bunin, A.A. Oxogoev. – Moscow : Nauka, 1994. – 383 p.
15. Ivanova, V.S. Synergetics and fractals. Universality of the mechanical behavior of materials / V.S. Ivanova, M.M. Zakirnichnaya, I.R. Kuzeev. – Ufa : Ufa State Oil Technical University. Univ., 1998. – Part 1. – 144 p.
16. Physico-chemical mechanics of dispersed structures / edited by P.A. Rebinder. – Moscow : Nauka, 1966. – 400 p.
17. Kalush, Yu.A. The Hurst exponent and its hidden properties / Yu.A. Kalush, V.M. Loginov // Siberian Journal of Industrial Mathematics. – 2002. – Vol. V, No 4(12). – P. 29–37.
18. Holden, J.G. Fractal analyses: statistical and methodological innovations and best practices / J.G. Holden, M.A. Riley, J. Gao, K. Torre // Frontiers of Physics. – 2013. – No 5. – P. 97.

УДК 661.3

DOI 10.54734/20722958_2025_3_20

Липецкий государственный технический университет

Россия, 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30, тел.: +7(4742) 328206

Дергунова Елена Сергеевна,
кандидат химических наук,
доцент кафедры «Химия»
E-mail: dergunova14@yandex.ru**Гончарова Маргарита Александровна**,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Строительное
материаловедение и дорожные технологии»
E-mail: magoncharova777@yandex.ru*Национальный исследовательский
университет «Московский государственный
строительный университет»*Россия, 129337, г. Москва, Ярославское
шоссе, д.26, тел.: +7 (495) 781-80-07**Ерофеев Владимир Трофимович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Строительное
материаловедение»
E-mail: yarofeevvt@mail.ru*Lipetsk State Technical University*Russia, 398024, Lipetsk, 30, Moskovskaya St.,
tel.: +7(4742) 328206**Dergunova Elena Sergeevna**,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Chemistry»
E-mail: dergunova14@yandex.ru**Goncharova Margarita Alexandrovna**,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
Department «Building Materials Science and
Road Technologies»
E-mail: magoncharova777@yandex.ru*National Research University Moscow State
University of Civil Engineering*Russia, 129337, Moscow, 26, Yaroslavskoye
highway, tel.: +7 (495) 781-80-07**Erofeev Vladimir Trofimovich**,
Doctor of Sciences, Professor, Professor of the
Department «Construction Materials Science»
E-mail: yarofeevvt@mail.ru

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСЛИВОСТИ БЕТОНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ БИОДОБАВКАМИ

Е.С. Дергунова, М.А. Гончарова, В.Т. Ерофеев

Приведены данные по комплексному исследованию выносливости бетонов, модифицированных биодобавками. В качестве биодобавки использовали уреазные бактерии, иммобилизованные с применением биополимеров. Испытания на выносливость выполняли согласно ГОСТ 24545-2021. Установлено, что выносливость биоминерализованного бетона обеспечена на уровне $0,5R_{пр}$ и на базе испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов.

Ключевые слова: прочность, бетон, портландцемент, биоминерализация, биодобавка, выносливость

COMPREHENSIVE STUDY OF THE ENDURANCE OF CONCRETES MODIFIED WITH BIO-ADMIXTURES

E.S. Dergunova, M.A. Goncharova, V.T. Erofeev

The article presents data of a comprehensive study of the endurance of concretes modified with bio-admixtures. Urease bacteria immobilized with biopolymers were used as a bio-admixtures. Endurance tests were performed according to GOST 24545-2021. It is found that the endurance of biomineralized concrete is provided at the level of $0.5 R_{pr}$ and based on tests of $2 \cdot 10^6$ cycles.

Keywords: strength, concrete, Portland cement, biomineralization, bio-admixtures, endurance

Введение. Внедрение природоподобных технологий в строительную отрасль может включать в себя использование материалов и методов, которые имитируют природные процессы и системы [1–3]. Например, это может быть применение биоматериалов, которые разлагаются естественным путём и не наносят вреда окружающей среде, или использование технологий, основанных на принципах

самоорганизации и адаптации, аналогичных тем, что наблюдаются в природе [4–6]. С экономической точки зрения крайне важно продлить срок службы бетонных зданий и сооружений, снизив спрос на новые материалы и, что ещё важнее, сократив высокие затраты на их обслуживание и ремонт [6, 7]. В этом вопросе активную роль может сыграть процесс биоминерализации – природоподобной технологии, в основе которой лежит способность некоторых микроорганизмов участвовать в химических реакциях и осаждать минералы с помощью клеточных структур или выделяемых ферментов. Активные исследования в этом направлении проводят ученые Китая, Италии, Португалии и других стран [2–7]. Отечественный опыт применения технологии биоминерализации подтверждается работами ученых Строковой В.В., Франк-Каменской О.В., Духаниной У.Н., Каленова С.В., Бруяко М.Г. и др. [1, 8–10].

Изучение способности биоминерализованных цементных композитов сохранять свои эксплуатационные характеристики под воздействием различных факторов, таких, как механические нагрузки, агрессивные среды, температурные колебания и другие внешние воздействия, является актуальной задачей строительного материаловедения, поскольку высокая выносливость бетона является ключевым фактором для обеспечения долговечности и надежности строительных конструкций.

Цель данной работы – провести комплексное исследование выносливости бетонов, модифицированных биодобавками. В ходе исследования необходимо решить следующие задачи:

- Сформировать биодобавки на основе уреазных бактерий с применением биополимеров.
- Сформировать бетонные системы для исследований.
- Оценить выносливость бетонов согласно ГОСТ 24545-2021.

1. Материалы и методы. Для исследований были взяты следующие материалы: вяжущее – портландцемент ЦЕМ 32,5 N 1 согласно ГОСТ 31108-2020. Мелкий заполнитель – полифракционный песок Вольский (ООО «Поликварц») согласно ГОСТ 6139-2020. Крупный заполнитель (фракция 10-20 мм) – сталеплавленный щебень (шлак) (ТМ «ЛРнеруд») согласно ГОСТ 8267-93. В качестве биодобавки использовали уреазные бактерии и споры рода *Bacillus*, инкапсулированные с применением природного агента для иммобилизации и сохранения активности бактерий альгината кальция. Оценка прочности на изгиб и сжатие осуществлялась с помощью методов согласно ГОСТ 18105-2018, ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 24552-2023. Возраст бетона к началу испытаний составил не менее 28 суток. Для контроля поверхности бетонных образцов применяли сканирующую электронную микроскопию (растровый электронный микроскоп TESCAN VEGA 3 SBH). Оценку выносливости бетонов проводили согласно ГОСТ 24545-2021 «Бетоны. Методы испытаний на выносливость».

2. Результаты и их обсуждение.

2.1. Формирование биодобавок. Уреазные бактерии в течение своей жизнедеятельности способны провоцировать образование кальцитов в различных матрицах, упрочняя их при этом [1, 2, 10]. Однако при использовании бактерий в бетонах их надо защищать от высокой щелочной среды. Для этого применяют такой процесс, как инкапсулирование бактерий, для реализации которого необходимы природные биополимеры – альгинаты. При формировании добавки предварительно растворяли альгинат кальция в воде, затем смесь бактериальной массы с питательной средой перемешивали с раствором альгината и пропускали через экструдер, формировали биодобавку в виде капсул размером до 4 мм (рис. 1а).

2.2. Формирование бетонных смесей. Формирование бетонных смесей включает ряд этапов, начиная от выбора компонентов и заканчивая процессом укладки и твердения смеси. Были изготовлены две параллели бетонных образцов согласно ГОСТ 24552. Состав смесей представлен в табл. 1. Водоцементное отношение для биоминерализованных (1) и контрольных (2) образцов бетона принимали В:Ц=0,54. Твердение образцов происходило при стандартных условиях.

Состав бетонных смесей на 1 м³

№ п/п	Портландцемент, кг	Песок, кг	Крупный заполнитель, кг	Добавка, кг	Плотность раствора, кг/м ³	В:Ц
1	335	640	1246	2	2226	0,54
2	337	640	1246	-	2225	0,54

а



б



Рис. 1. Биодобавка для бетонов (а) и фото разлома бетона, получено с применением сканирующей электронной микроскопии (б)

Часть сформированных образцов исследовали с применением сканирующей электронной микроскопии. Было установлено, что в порах биоминерализованного бетона находится кальцит (рис. 1б), одна из природных форм карбоната кальция, образованного в результате использования биодобавки.

2.3. Проведение испытаний на выносливость. Испытания проводили в двух параллелях с образцами биоминерализованного бетона и контрольного бетона, приготовленного без использования биодобавок. Примем начальную базу испытаний для контрольного и биоминерализованного бетона – $2 \cdot 10^6$ циклов. Испытания бетона на выносливость проводили на образцах-призмах размерами 100×100×400 мм в соответствии с крупностью заполнителя в пробах. Предварительно определяли призмную прочность образцов. Результаты представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Результаты определения призмной прочности биоминерализованных (1) и контрольных (2) образцов бетона

№ п/п	Призмная прочность образцов, МПа	
	1	2
1	36,2	28,3
2	36,1	27,4
3	36,2	28,5
$\overline{R_{пр}}$	36,2	28,1

Как видно из результатов, призмная прочность у биоминерализованных образцов выше на 27 %, чем у контрольных. Это подтверждают результаты исследований, сделанных ранее [10].

2.4. Построение кривой выносливости и оценка результатов испытаний. Последовательно проводят испытания образцов на четырех уровнях нагружения, составляющих 0,9; 0,8; 0,7 и 0,6 от разрушающей нагрузки, принимая значения

коэффициента асимметрии цикла напряжения $p_6 = 0,1$, с частотой многократно повторяющегося нагружения, равной 10 Гц. Результаты испытаний представлены в табл. 3. По результатам испытаний было получено уравнение регрессии вида:

$$\frac{\sigma_{\max}}{R_{\text{пр}}} = A - B \cdot \lg \bar{n}.$$

Т а б л и ц а 3

Результаты испытаний биоминерализированных (1)
и контрольных (2) образцов бетона

Номер испытания	Уровень нагружения, η	$\bar{n}_i$		$\lg \bar{n}$	
		1	2	1	2
1	0,9	2500	1000	3,176	2,903
2	0,9	3900	1100	3,279	3,041
3	0,9	5000	1500	3,301	3,176
4	0,8	9000	5000	3,903	3,699
5	0,8	15000	5500	3,954	3,740
6	0,8	20000	7500	4,000	3,875
7	0,7	80000	32000	4,903	4,505
8	0,7	110000	28000	5,054	4,447
9	0,7	140000	100000	5,146	4,954
10	0,6	825800	467000	5,917	5,669
11	0,6	960000	590000	5,982	5,771
12	0,6	980000	650000	5,991	5,775

Уравнение регрессии и уравнения линий верхней и нижней границ доверительного интервала, при которых проводят оценку соответствия бетона требованиям к его выносливости для биоминерализованных и контрольных образцов бетона приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Сводные данные по расчету регрессии для биоминерализованных (1)
и контрольных (2) образцов бетона

Показатель регрессионного анализа	Серия образцов бетона	
	1	2
Уравнение регрессии	$\frac{\sigma_{\max}}{R_{\text{пр}}} = 1,23 - 0,1078 \cdot \lg \bar{n}$	$\frac{\sigma_{\max}}{R_{\text{пр}}} = 1,21 - 0,1073 \cdot \lg \bar{n}$
Уравнение линий верхней границы доверительного интервала	$\frac{\sigma_{\max}}{R_{\text{пр}}} = 1,23 - 0,0987 \cdot \lg \bar{n}$	$\frac{\sigma_{\max}}{R_{\text{пр}}} = 1,21 - 0,0921 \cdot \lg \bar{n}$
Уравнение линий нижней границы доверительного интервала	$\frac{\sigma_{\max}}{R_{\text{пр}}} = 1,23 - 0,1170 \cdot \lg \bar{n}$	$\frac{\sigma_{\max}}{R_{\text{пр}}} = 1,21 - 0,1220 \cdot \lg \bar{n}$

С учетом вышеприведенных уравнений на рис. 2 (а, б) представлены линии регрессии с границами доверительного интервала в виде координатах $\frac{G_{\max}}{R_{\text{пр}}} - \lg \bar{n}$ для

биоминерализованных и контрольных образцов бетона.

Также была проведена проверка на соответствие бетона требованиям к его выносливости с применением статистического пакета ПО «Engage» (ООО «РИТМ»). Было установлено, что все результаты испытаний являются значимыми и могут быть учтены для оценки выносливости бетона. Поскольку среднее значение циклов для разрушения биоминерализованного бетона составило не менее $35 \cdot 10^6$, что превышает значения для контрольных образцов ($9 \cdot 10^6$ циклов) более чем в 3 раза, следовательно, выносливость бетона обеспечена на уровне $0,5R_{\text{пр}}$ и на базе испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов согласно ГОСТ 24545.

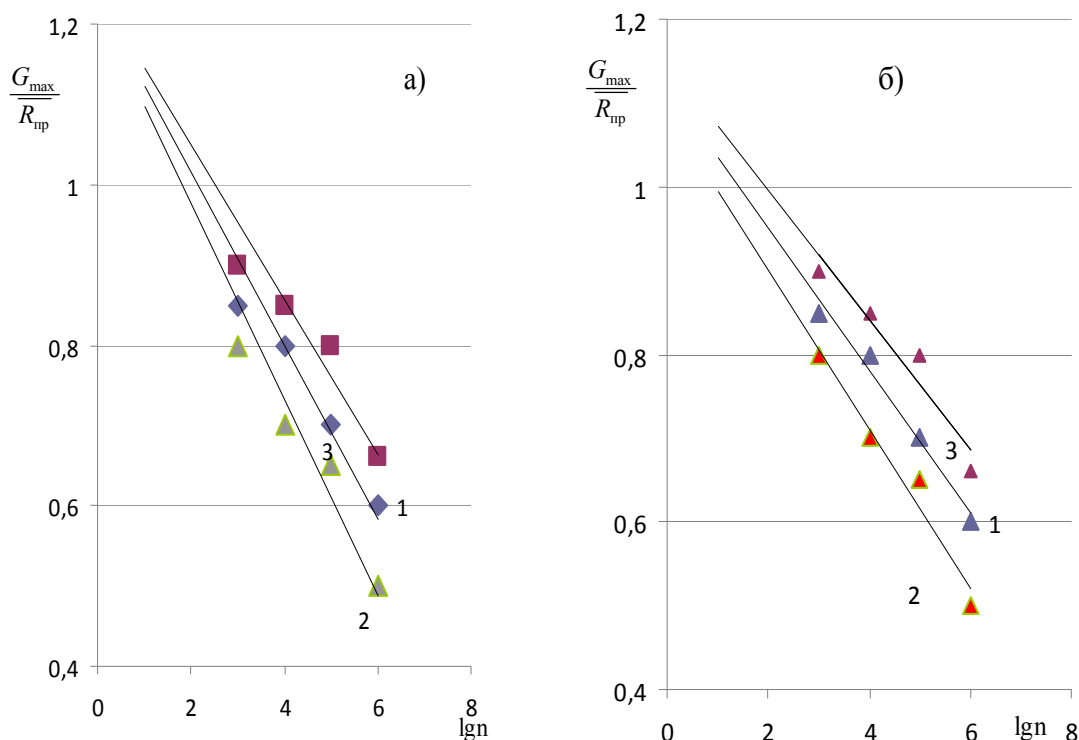


Рис. 2. Линия регрессии с границами доверительного интервала по результатам испытаний на выносливость:

а – образцов бетона с биодобавками; б – контрольных образцов бетона
(1 – линия регрессии, 2, 3 – линия нижней и верхней границ доверительного интервала)

Закключение. Получены биодобавки для бетона на основе уреазных бактерий, инкапсулированных в альгинатный гель с размером капсулы не более 4 мм. Образцы бетона изготавливали с применением портландцемента в качестве вяжущего и сталеплавленного щебня в качестве крупного заполнителя. Экспериментально определены значения призмной прочности: $R_{pr} = 36,2$ и $28,1$ МПа соответственно для биоминерализованных и контрольных образцов бетона. Проведены исследования, построены линии регрессии для образцов бетона, рассчитано количество циклов многократного нагружения. Уставлено, что выносливость бетона, модифицированного биодобавками на уровне $0,5R_{pr}$ и на базе испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов согласно ГОСТ 24545, обеспечена.

Список литературы

1. Строкова, В.В. Полиморфизм и морфология карбонатов кальция в технологиях строительных материалов, использующих бактериальную биоминерализацию (обзор) / В.В. Строкова, У.Н. Духанина, Д.А. Балицкий [и др.] // Строительные материалы. – 2022. – № 1–2.
2. Charpe, A. U. Microbially assisted cementation – A biotechnological approach to improve mechanical properties of cement / A. U. Charpe, M.V. Latkar, T. Chakrabarti // Construction and Building Materials. – 2017. – V. 135. – P. 472–476.
3. Experimental analysis of self healing properties of bacterial concrete / P. Pachaivannan, C. Hariharasudhan, M. Mohanasundram, M.A. Bhavani // Materials Today: Proceedings. – 2020. – V. 33, P. 7. – P. 3148–3154.
4. Seidl, S. Fatigue and fracture properties of concrete mixtures with various water to cement ratio and maximum size of aggregates / S. Seidl, A. Benešová, Á.P. Pascual [et al.] // Procedia Structural Integrity. – 2022. – V. 42. – P. 1512–1519. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.192>.
5. Kachkouch, F.Z. Fatigue behavior of concrete: A literature review on the main relevant parameters / F.Z. Kachkouch, C.C. Noberto, L.F. de Albuquerque Lima Babadopulos [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – V. 338. – 127510.

6. Assessment of mechanical attributes and microstructural densification of self-healing recycled coarse aggregate concrete using various bacterial immobilizers/ M.K. Akhtar, M. Kanwal, R.A. Khushnood, M. B. E. Khan// *Journal of Building Engineering*. – 2023. – V. 69. – 106229.
7. Indhumathi, S. Diverse perspectives on self healing ability of Engineered Cement Composite – All-inclusive insight / S. Indhumathi, A. Dinesh, M. Pichumani// *Construction and Building Materials*. – 2022. – V. 323. – 126473.
8. Каленов, С.В. Препарат на основе бактерий, выделенных из гиперсоленых сред, для улучшения функциональных и защитных характеристик бетона / С.В. Каленов, Н.Б. Градова, С.П. Сивков [и др.] // *Биотехнология*. – 2020. – Т. 36, № 4. – С. 21–28.
9. Биомодифицирование строительных материалов бактериями с уреазной активностью / М.Г. Бруяко, А.И. Григорьева, Д.С. Голотенко, А.А. Подсевалова. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-88-2-5-15 // *Строительство и реконструкция*. – 2020. – № 2(88). – С. 5–15.
10. Гончарова, М. А. Особенности применения процесса биоминерализации для улучшения структурно-прочностных свойств бетона / М. А. Гончарова, Е. С. Дергунова // *Строительные материалы*. – 2023. – № 1–2. – С. 25–31.

References

1. Strokova, V.V. Polymorphism and morphology of calcium carbonates in construction materials technologies using microbial biomineralization (review) / V.V. Strokova, U.N. Dukhanina, D.A. Balitsky [et al.] // *Construction Materials*. – 2022. – № 1–2. – P. 82–122 (In Russian).
2. Charpe, A.U. Microbially assisted cementation – A biotechnological approach to improve mechanical properties of cement / A.U. Charpe, M.V. Latkar, T. Chakrabarti // *Construction and Building Materials*. – 2017. – V. 135. – P. 472–476.
3. Experimental analysis of self healing properties of bacterial concrete / P. Pachaiyannan, C. Hariharasudhan, M. Mohanasundram, M. A. Bhavani // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – V. 33, P. 7. – P. 3148–3154.
4. Seitzl, S. Fatigue and fracture properties of concrete mixtures with various water to cement ratio and maximum size of aggregates / S. Seitzl, A. Benešová, Á.P. Pascual et al. // *Procedia Structural Integrity*. – 2022. – V. 42. – P. 1512–1519. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.192>.
5. Kachkouch, F. Z. / Fatigue behavior of concrete: A literature review on the main relevant parameters / F. Z. Kachkouch, C. C. Noberto, L. F. de Albuquerque Lima Babadopulos [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2022. – V. 338. – 127510.
6. Assessment of mechanical attributes and microstructural densification of self-healing recycled coarse aggregate concrete using various bacterial immobilizers / M. K. Akhtar, M. Kanwal, R. A. Khushnood, M. B. E. Khan // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – V. 69. – 106229.
7. Indhumathi, S. Diverse perspectives on self healing ability of Engineered Cement Composite – All-inclusive insight / S. Indhumathi, A. Dinesh, M. Pichumani // *Construction and Building Materials*. – 2022. – V. 323. – 126473.
8. Kalenov, S.V. A preparation based on bacteria isolated from hypersaline environments to improve the functional and protective characteristics of concrete/ S.V. Kalenov, N.B. Gradova, S.P. Sivkov [et al.] // *Biotehnologiya*. – 2020. – V. 36, № 4. – P. 21–28 (In Russian).
9. Biomodification of building materials by bacteria with urease activity / M.G. Bruyako, A.I. Grigoreva, D.S. Golotenko, A.A. Podsevalova. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-88-2-5-15 // *Building and Reconstruction*. – 2020 – V.2. – P. 5–15. (In Russian).
10. Goncharova, M.A. Features of the application of the bio-mineralization process to improve the structural and strength properties of concrete / M.A. Goncharova, E.S. Dergunova // *Construction Materials*. – 2023. – № 1–2. – P. 25–31. (In Russian).

УДК 691.4:692.115

DOI 10.54734/20722958_2025_3_26

*ООО НПП «Геотек»*Россия, 440004, г. Пенза,
ул. Центральная, стр. 1М,
тел.: (8800) 200-16-05**Идрисов Илья Хамитович,**
кандидат технических наук,
генеральный директор**Болдырев Геннадий Григорьевич,**
доктор технических наук, директор
по научной работе и инновациям*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*NPP Geotek LLC*Russia, 440004, Penza,
building 1M, Tsentralnaya St.,
tel.: (8800) 200-16-05**Idrisov Ilya Khamitovich,**
Candidate of Sciences, General Director**Boldyrev Gennady Grigorievich,**
Doctor of Sciences, Director of Research and
Innovation*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

ИСПЫТАНИЯ ГЛИНОШЛАКОВЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ОДНОПЛОСКОСТНОГО СРЕЗА И ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

И.Х. Идрисов, Г.Г. Болдырев, Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

Приведены результаты испытаний образцов глины в естественном состоянии и образцов глиношлакового композита при 20 %-м содержании шлака методом одноплоскостного среза по двум режимам нагружения сдвигающей нагрузкой и методом трехосного сжатия с целью определения характеристик прочности и деформируемости. Испытания глиношлаковых образцов на седьмые сутки твердения выполнены в условиях консолидированно-дренированного одноплоскостного сдвига и трехосного сжатия. Полученные параметры – модуль деформации, угол внутреннего трения и силы удельного сцепления – рекомендуется использовать при расчете закрепленных оснований зданий и сооружений по предельным состояниям.

Ключевые слова: глиношлаковый композит; одноплоскостной срез; трехосное сжатие; модуль упругости; модуль деформации; условие прочности Мора – Кулона

TESTING OF CLAY-SLAG COMPOSITES UNDER CONDITIONS OF SINGLE-PLANE SHEAR AND THREE-AXIS COMPRESSION

I.Kh. Idrisov, G.G. Boldyrev, N.I. Makridin, I.N. Maksimova

The soil was tested in its natural state using a single-plane shear method in two modes of shear loading and the three-axis compression method to determine the characteristics of strength and deformability. The tests of clay-slag mixture samples at 20 % slag content on the seventh day of hardening were performed under conditions of consolidated-drained shear and triaxial compression. The obtained results serve as a recommendation for calculations of building structures or foundations.

Keywords: clay-slag composite; single-plane section; triaxial compression; modulus of elasticity; modulus of deformation; the Mohr – Coulon strength condition

Согласно ГОСТ 12248 [1, 2], испытания образцов грунта для определения характеристик прочности и деформируемости немерзлых пылевато-глинистых грунтов проводятся с использованием следующих методов: одноосного сжатия; компрессионного сжатия [3]; одноплоскостного среза [1]; трехосного сжатия [2].

Испытание грунта методом одноплоскостного среза выполняют для определения следующих характеристик прочности: сопротивления грунта срезу τ , угла внутреннего трения φ , удельного сцепления c для песков (кроме гравелистых и крупных), глинистых и органоминеральных грунтов.

Эти характеристики определяют по результатам испытаний образцов грунта в одноплоскостных срезных приборах с фиксированной плоскостью среза путем сдвига одной части образца относительно другой его части касательной нагрузкой при одновременном нагружении образца нагрузкой, нормальной к плоскости среза. Внешний вид приборов приведен на рис. 1.



Рис. 1. Приборы для испытания материалов на сдвиг:
а – статическое нагружение; б – нагружение с заданной скоростью деформации сдвига (патенты № 64310, 66389 [4, 5])

Испытания образцов грунта проводят по двум режимам нагружения сдвигающей нагрузкой. В первом случае применяется статическое нагружение ступенями с выдержкой на каждой ступени до условной стабилизации деформаций (см. рис. 1, а), во втором случае – кинематическое нагружение непрерывно с заданной скоростью движения срезной коробки прибора (см. рис. 1, б).

Угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c определяют как параметры линейной зависимости из условия прочности Кулона:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c. \quad (1)$$

Испытание грунта методом трехосного сжатия проводят для определения следующих характеристик прочности и деформируемости: угла внутреннего трения φ , удельного сцепления c , сопротивления недренированному сдвигу c_u , модуля деформации E и коэффициента поперечной деформации ν .

Эти характеристики определяют по результатам испытаний образцов грунта в приборах трехосного сжатия (рис. 2), дающих возможность бокового расширения образца грунта в условиях трехосного осесимметричного статического нагружения при $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$, где σ_1 – максимальное главное напряжение; $\sigma_2 = \sigma_3$ – минималь-

ные, они же промежуточные, главные напряжения. Схема испытаний приведена на рис. 3.

Испытания в условиях трехосного сжатия выполняются с целью определения параметров прочности и деформируемости, которые приведены в табл. 1. В зависимости от вида определяемого параметра принимается тот или иной тип испытаний.

Т а б л и ц а 1

Тип и условия испытаний в условиях трехосного сжатия, определяемые параметры

Тип испытаний	Применяемые стандарты	Условия испытаний	Определяемые параметры
Неконсолидированно-недренированные (НН-испытания)	ГОСТ 12248.3–2020, ASTM D 2850–23, BS 1737-7, ISO 17892-8:2018	Без измерения порового давления	Недренированная прочность c_u
Консолидированно-недренированные (КН-испытания)	ГОСТ 12248.3–2020, ASTM D 4767–11, BS 1737-8	С измерением или без измерения порового давления	Параметры прочности в полных или эффективных напряжениях: φ , c , φ' , c'
Консолидированно-дренированные (КД-испытания)	ГОСТ 12248.3–2020, ISO 17892-9:2018	Без измерения порового давления	Параметры прочности в полных напряжениях: φ , c Модуль упругости и модуль общей деформации: E_e , E



Рис. 2. Прибор трехосного сжатия (патенты № 85167, 64648 [6, 7])

Испытания в условиях трехосного сжатия проводятся с образцами грунта цилиндрической формы диаметром 38 или 50 мм при высоте 76 и 100 мм соответственно. Образец грунта помещается внутрь резиновой оболочки толщиной 0,3 мм в случае испытания мелкозернистого песка и однородных глинистых грунтов. При испытании крупнозернистого песка, гравия или глинистых грунтов с наличием включений

применяют резиновую оболочку толщиной 0,6 мм. В обоих случаях при обработке результатов испытаний учитывается сопротивление резиновой оболочки растяжению путем корректировки осевого напряжения σ_1 .

Схема испытаний и схема рабочей камеры прибора трехосного сжатия приведены на рис. 3 и 4 соответственно.

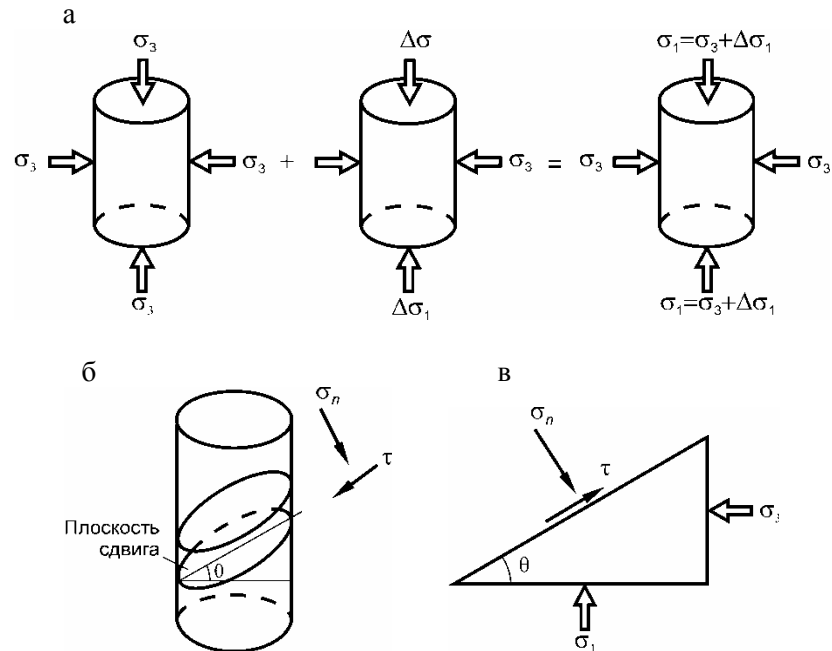


Рис. 3. Предварительное гидростатическое обжатие образца и добавочное нагружение внешней нагрузкой (а); наклонная плоскость сдвига (б, в)

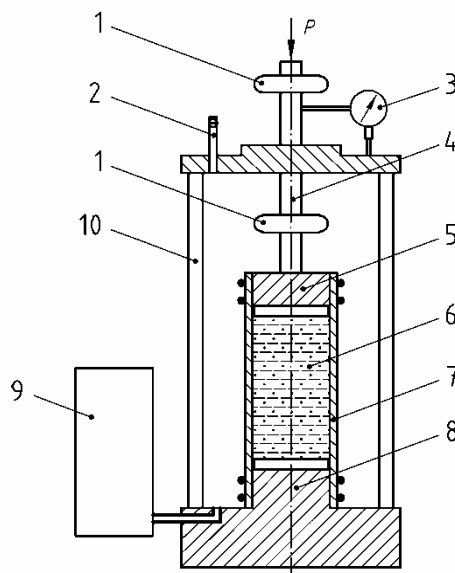


Рис. 4. Схема рабочей камеры прибора трехосного сжатия:
 1 – держатель датчика перемещений; 2 – клапан для перелива жидкости;
 3 – датчик перемещений; 4 – шток; 5 – штамп; 6 – образец материала;
 7 – резиновая оболочка; 8 – основание; 9 – регулятор давления;
 10 – цилиндрическая оболочка камеры давления

Модуль деформации E , МПа, и коэффициент поперечной деформации ν определяют при испытаниях (или на этапах испытаний), которые проводятся при постоянном значении всесторонних напряжений σ_3 ($\Delta\sigma_3 = 0$), и вычисляют по формулам:

$$E = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1}; \quad (2)$$

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1}, \quad (3)$$

где $\Delta\sigma_1$ – приращение напряжений σ_1 в заданном диапазоне; $\Delta\varepsilon_1$ и $\Delta\varepsilon_3$ – приращения относительных вертикальной и поперечной деформаций образца.

Если известно значение угла θ (рис. 3, в), то могут быть найдены напряжения τ и σ_n . В некоторых случаях экспериментальным путем трудно определить угол наклона плоскости сдвига θ , так как в образце не образуется видимой плоскости сдвига, образец деформируется в виде «бочки» (рис. 5). В этом случае за предельную нагрузку принимается значение, соответствующее 20 % от вертикальной деформации.

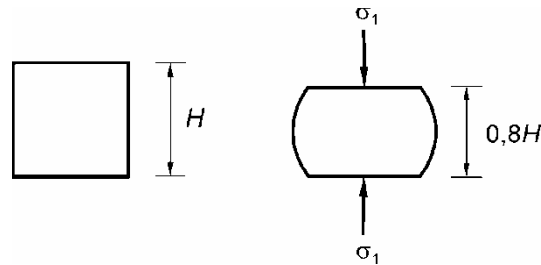


Рис. 5. Разрушение в виде «бочки»

Если на график нанести все значения τ и σ_n для каждого угла θ от 0 до 90° , то получим круг радиусом $0,5(\sigma_1 - \sigma_3)$ с центром $\tau = 0$ и $\sigma_n = 0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$. Этот круг называется кругом напряжений Мора (рис. 6). Касательная к кругу Мора, построенная с использованием предельного значения напряжения σ_1 , является предельной прямой. Для случая материалов, обладающих структурными связями, необходимо построить не менее двух предельных кругов Мора, т.е. провести опыты при различных значениях бокового давления σ_3 .

Используя предельную прямую, находят угол внутреннего трения ϕ и силу удельного сцепления c .

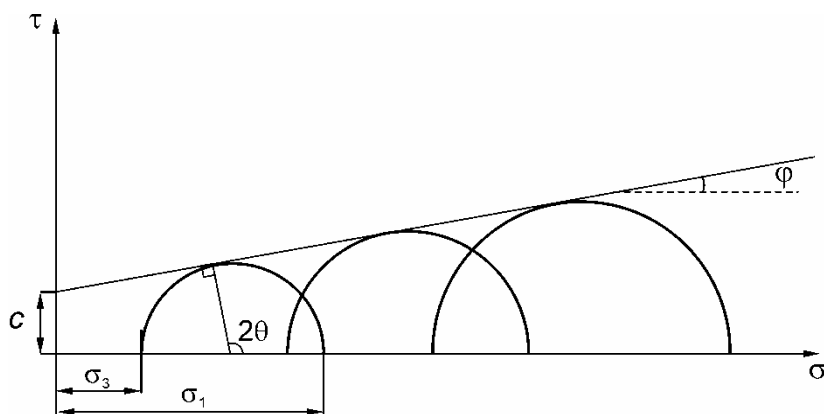


Рис. 6. Предельная прямая для материала, обладающего структурной прочностью

Испытания образцов глины в природном состоянии с целью исследования прочностных свойств в условиях одноплоскостного среза выполнялись в условиях консолидированно-дренированного сдвига, по методу ГОСТ 12248.1–2020 [1], с целью определения параметров прочности φ и c , входящих в условие прочности Мора – Кулона (1). Результаты испытаний приведены на рис. 7–9.

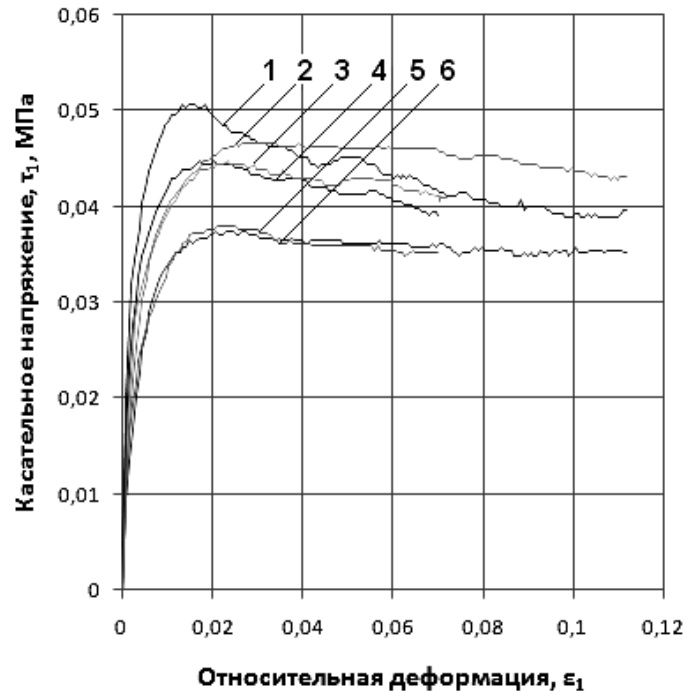


Рис. 7. Зависимость касательной нагрузки от относительной деформации сдвига:
1, 2, 3, 4, 5, 6 – результаты испытаний; $\sigma = 100$ кПа

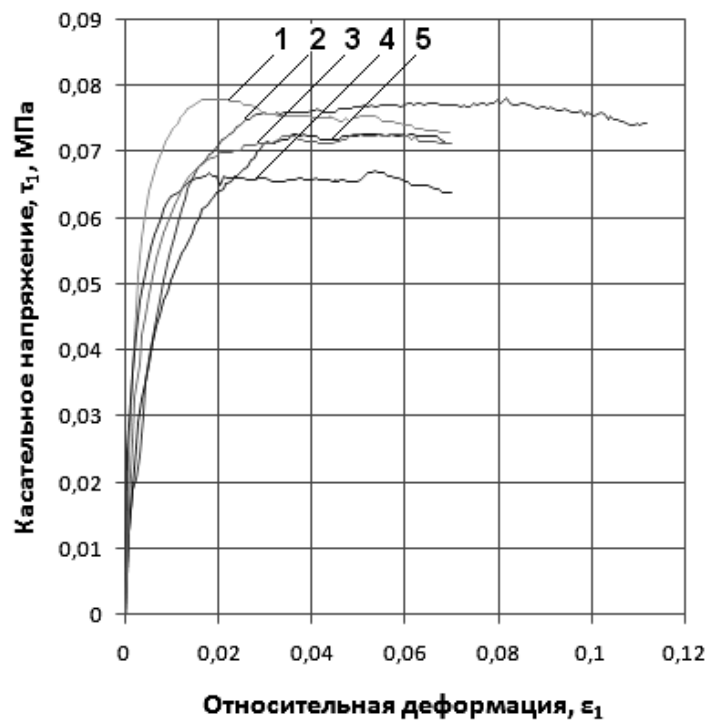


Рис. 8. Зависимость касательной нагрузки от относительной деформации сдвига:
1, 2, 3, 4, 5 – результаты испытаний; $\sigma = 200$ кПа

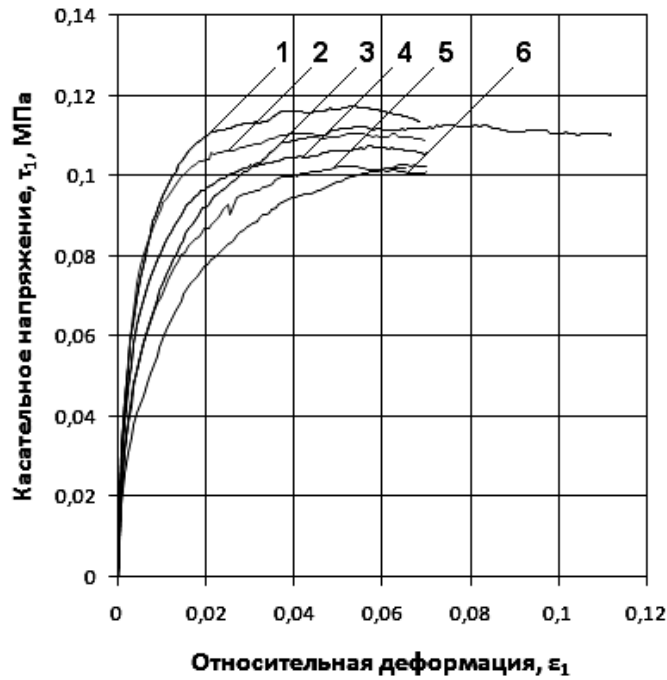


Рис. 9. Зависимость касательной нагрузки от относительной деформации сдвига:
1, 2, 3, 4, 5, 6 – результаты испытаний; $\sigma = 300$ кПа

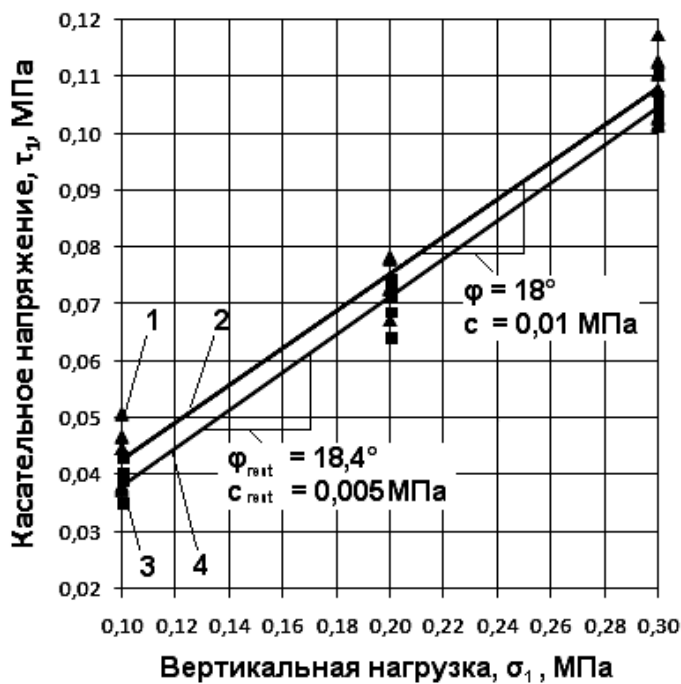


Рис. 10. Зависимость касательного напряжения от вертикальной нагрузки:
1 – точки разрушения, соответствующие максимальной прочности; 2 – линейная аппроксимация точек разрушения; 3 – точки разрушения, соответствующие остаточной прочности; 4 – линейная аппроксимация точек остаточной прочности

В результате анализа данных испытаний получены следующие значения параметров из условия прочности Кулона (рис. 10): угол внутреннего трения $\varphi=18-18,4^\circ$, силы удельного сцепления $c = (0,005-0,01)$ МПа.

Испытания образцов глиношлаковой смеси при 20 %-м содержании шлака на седьмые сутки твердения были выполнены в условиях консолидированно-дренированного сдвига, по методу ГОСТ 12248.1–2020 [1]. Результаты испытаний приведены на рис. 11–13.

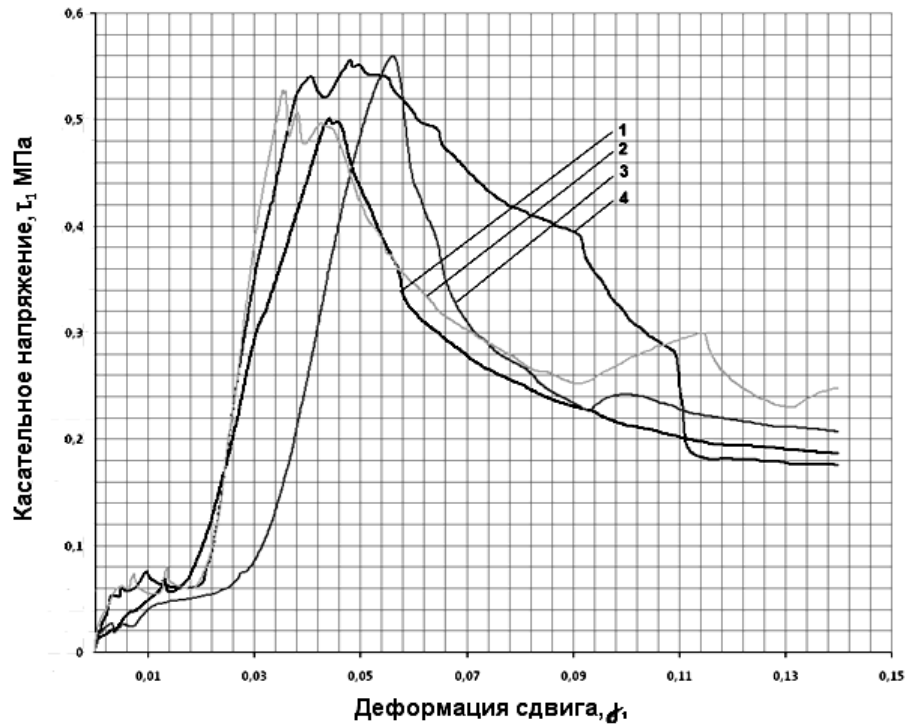


Рис. 11. Результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси в условиях одноплоскостного сдвига при 20 %-м содержании шлака и нормальном давлении 200 кПа, семь суток твердения

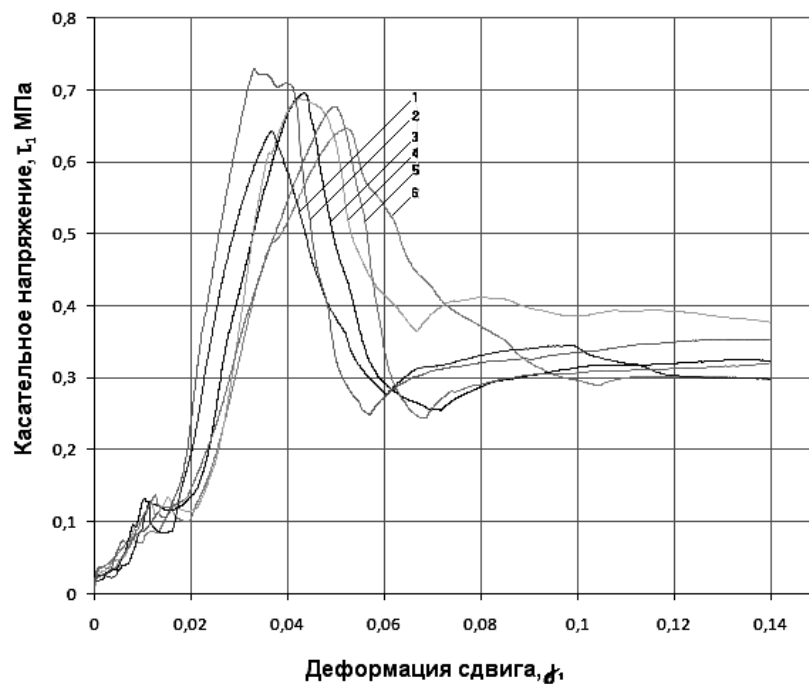


Рис. 12. Результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси в условиях одноплоскостного сдвига при 20 %-м содержании шлака и нормальном давлении 400 кПа, семь суток твердения

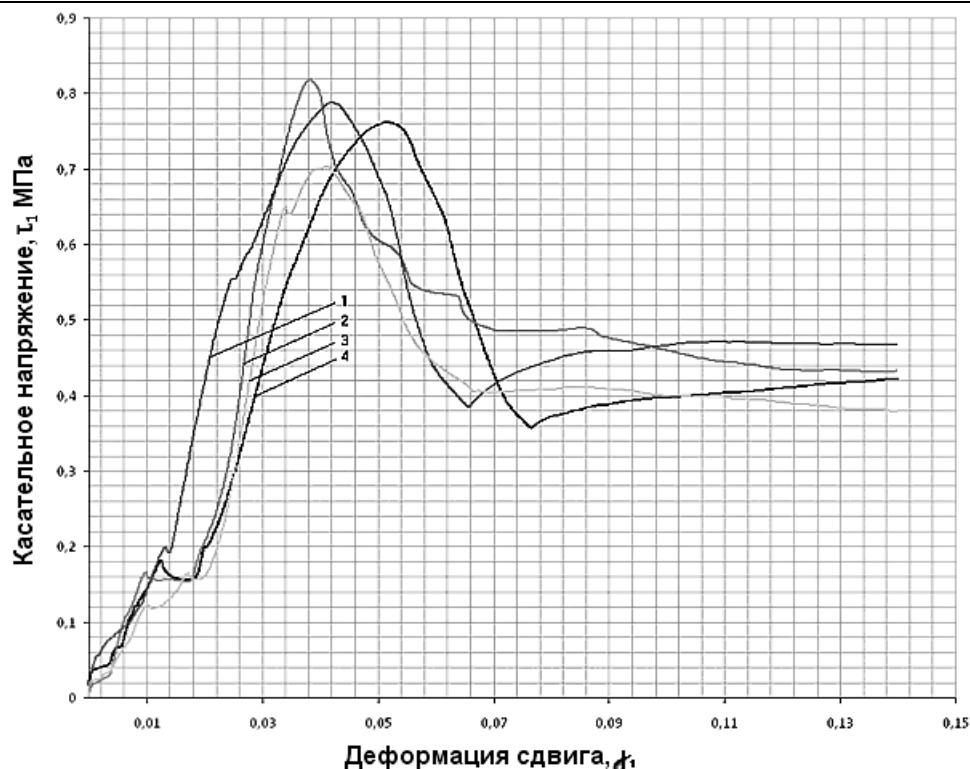


Рис. 13. Результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси в условиях одноплоскостного сдвига при 20 %-м содержании шлака и нормальном давлении 600 кПа, семь суток твердения

С использованием максимальных значений прочности на сдвиг из условия прочности Кулона (1) были найдены параметры этого закона ϕ и c (рис. 14), которые равны $\phi=30^\circ$ и $c=0,43$ МПа (прямая 2, рис. 14). Остаточные значения параметров прочности (прямая 4, рис. 14) равны: $\phi_{rest}=29^\circ$, сила удельного сцепления $c_{rest}=0,1$ МПа. Можно сделать вывод о влиянии величины деформации сдвига на параметры прочности. При деформации сдвига от 4–5 % мы имеем максимум прочности и параметры прочности: 30° и 0,43 МПа, а при деформации сдвига в 13 % получаем практически тот же угол внутреннего трения ($30\text{--}29^\circ$) и падение сил сцепления почти в четыре раза (c 0,43 до 0,1 МПа). Это объясняется полным разрушением структурных (цементационных) связей в шлакогрунте при практически той же площади контактов между частицами материала.

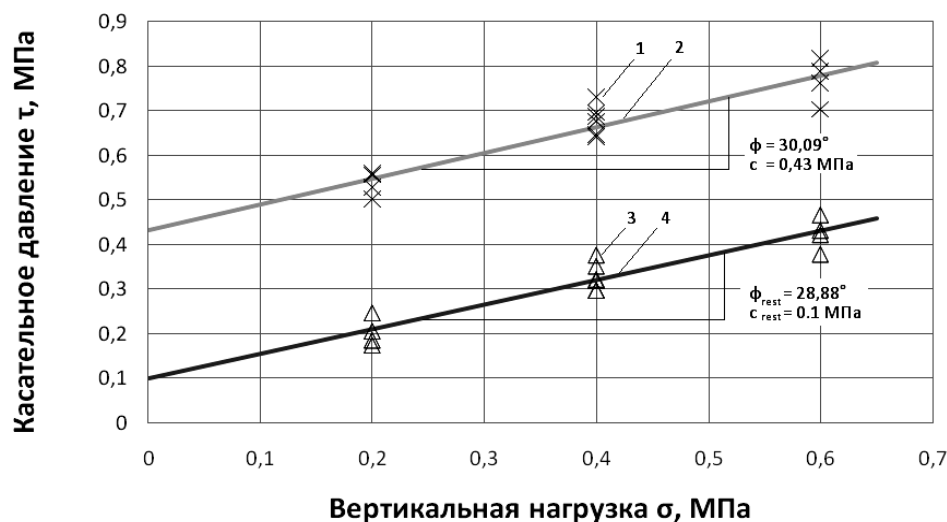


Рис. 14. Определение параметров прочности ϕ и c с использованием условия прочности Кулона

Введение шлака приводит также к изменению характера зависимости «касательное напряжение – деформация сдвига». Если для естественного грунта (см. рис. 7–9) имеет место упрочнение материала с небольшим разупрочнением после достижения предела прочности, то для грунта с введением вяжущего наблюдается явное разупрочнение материала до остаточного значения (см. рис. 11–13).

При введении шлака также изменяются параметры, входящие в условие прочности Кулона. Для грунта в природном состоянии $\varphi=18^\circ$, $c=(0,005-0,01)$ МПа, а введение 20 % шлака приводит к их значительному увеличению: $\varphi=30^\circ$, $c=0,43$ МПа. Силы удельного сцепления возрастают в 40–43 раза.

Данные параметры используются при расчете оснований зданий и сооружений по несущей способности с использованием аналитических и инженерных решений, например СП 22.13330.2016 [8], или при расчете с использованием нелинейной механики с помощью различного программного обеспечения, например Plaxis, Flac, Z-Soil, Geo-Slope, Ansys, Abaqus, Ls-Dyna и др.

Испытания образцов глины и глиношлаковой смеси с целью исследования прочностных и деформационных свойств в условиях трехосного сжатия выполнялись по методу ГОСТ 12248.3–2020 [2] с целью определения параметров прочности φ и c , модуля упругости E , коэффициента Пуассона ν , модуля объемного сжатия K , модуля сдвига G .

Испытания образцов данной серии опытов проводились при различном всестороннем давлении $\sigma_2 = \sigma_3$, которое принималось равным 100, 200, 300 кПа.

Результаты испытания образцов глины в природном состоянии приведены на рис. 15–17.

В результате испытаний глины в естественном природном состоянии получены параметры прочности Мора – Кулона, равные $\varphi=18,5^\circ$, силы удельного сцепления $c=0,014$ МПа (рис. 18). Испытания в условиях одноплоскостного сдвига показали значения, равные $\varphi=18-18,4^\circ$, силы удельного сцепления $c=0,005-0,01$ МПа. В данном случае влияние вида напряженного состояния на параметры прочности практически отсутствует.

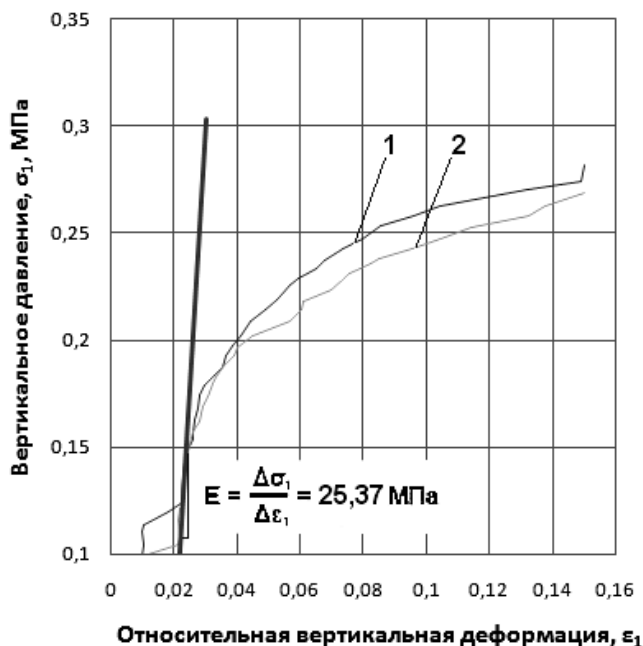


Рис. 15. Зависимость вертикального давления от относительной вертикальной деформации:
1, 2, 3 – результаты испытаний; $\sigma_3 = 100$ кПа

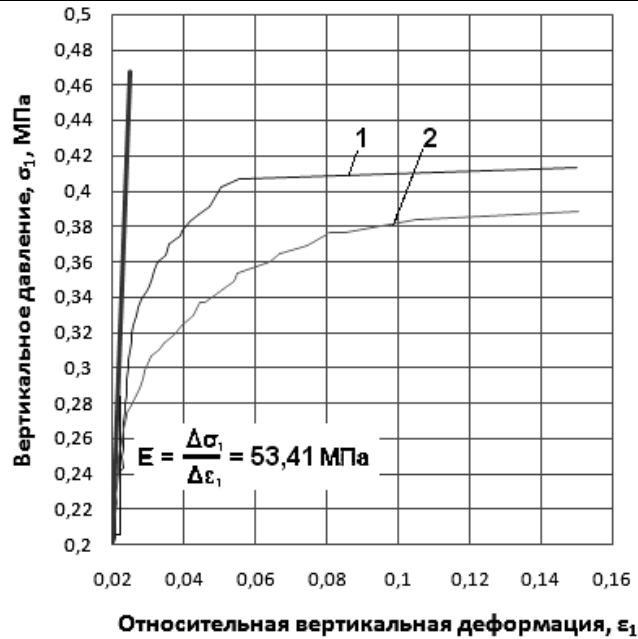


Рис. 16. Зависимость вертикального давления от относительной вертикальной деформации:

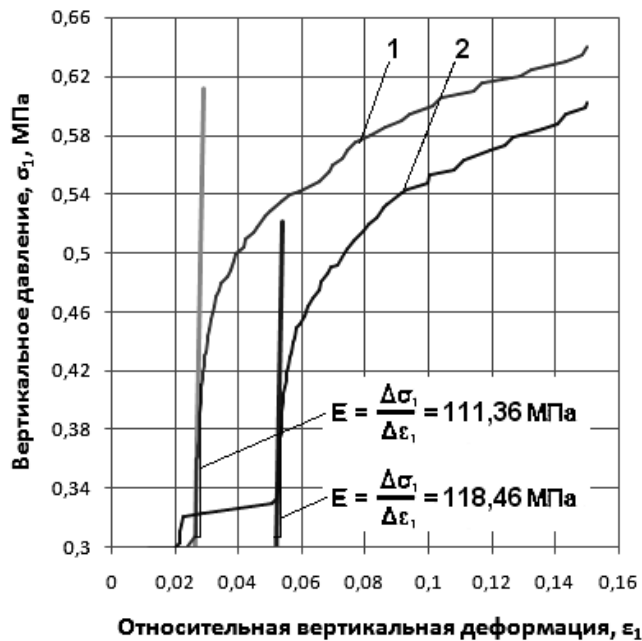
 1, 2 – результаты испытаний; $\sigma_3 = 200 \text{ кПа}$


Рис. 17. Зависимость вертикального давления от относительной вертикальной деформации:

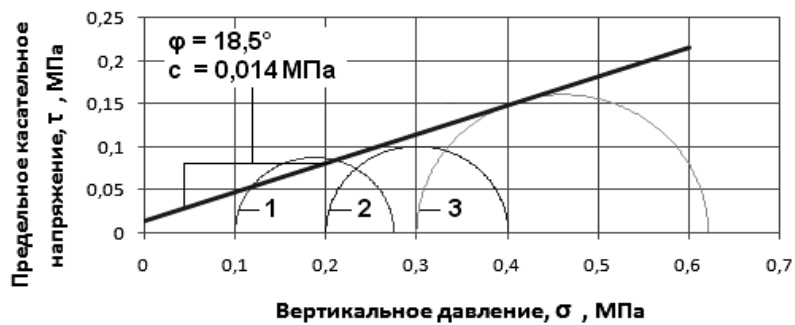
 1, 2 – результаты испытаний; $\sigma_3 = 300 \text{ кПа}$


Рис. 18. Диаграмма Мора – Кулона:

1, 2, 3 – круги Мора, построенные по усредненным результатам испытаний (см. рис. 15–17)

Как видно из рис. 15–17, разрушение материала сопровождается его упрочнением, за исключением опыта № 1 на рис. 16. Поэтому при определении параметров прочности φ и c нагрузка, соответствующая пределу прочности, была принята при осевой деформации в 15 %, что соответствует рекомендациям ГОСТ 12248.3–2020 [2].

Результаты испытания образцов глиношлаковой смеси при 20 %-м содержании шлака на седьмые сутки твердения приведены на рис. 19–21. Давление всестороннего обжатия $\sigma_2 = \sigma_3$ принималось равным 200, 400 и 600 кПа; увеличение давления (для глины в естественном состоянии, напомним, оно составляло 100, 200, 300 кПа) обосновано ростом жесткости материала с введением вяжущего.

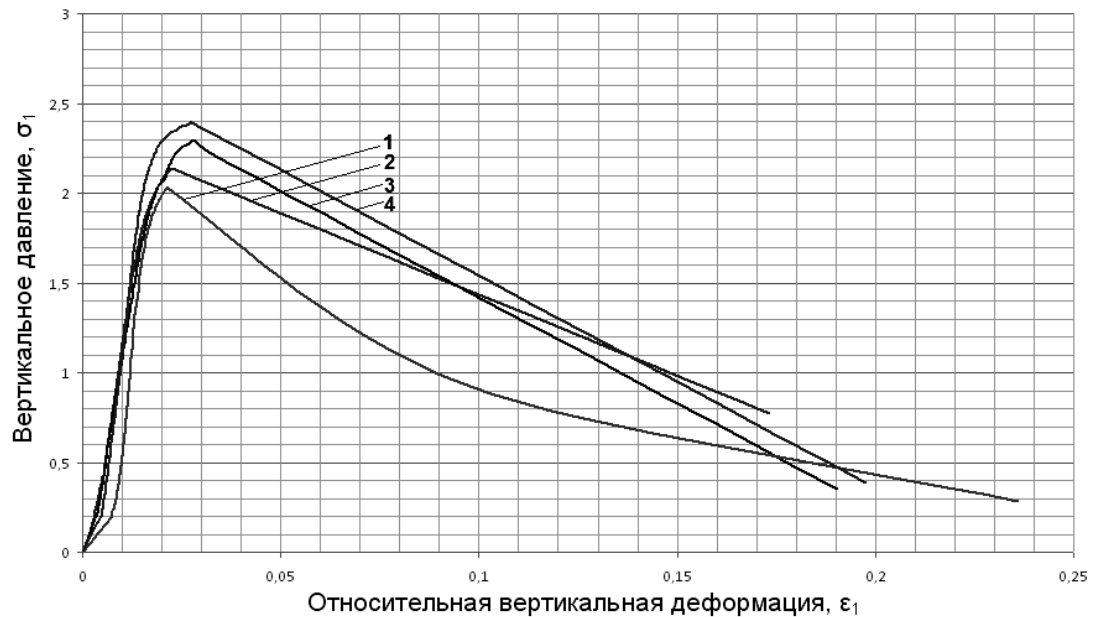


Рис. 19. Зависимость осевой деформации от осевого напряжения глиношлаковой смеси при постоянном боковом напряжении 200 кПа при 20 %-м содержании шлака на седьмые сутки твердения

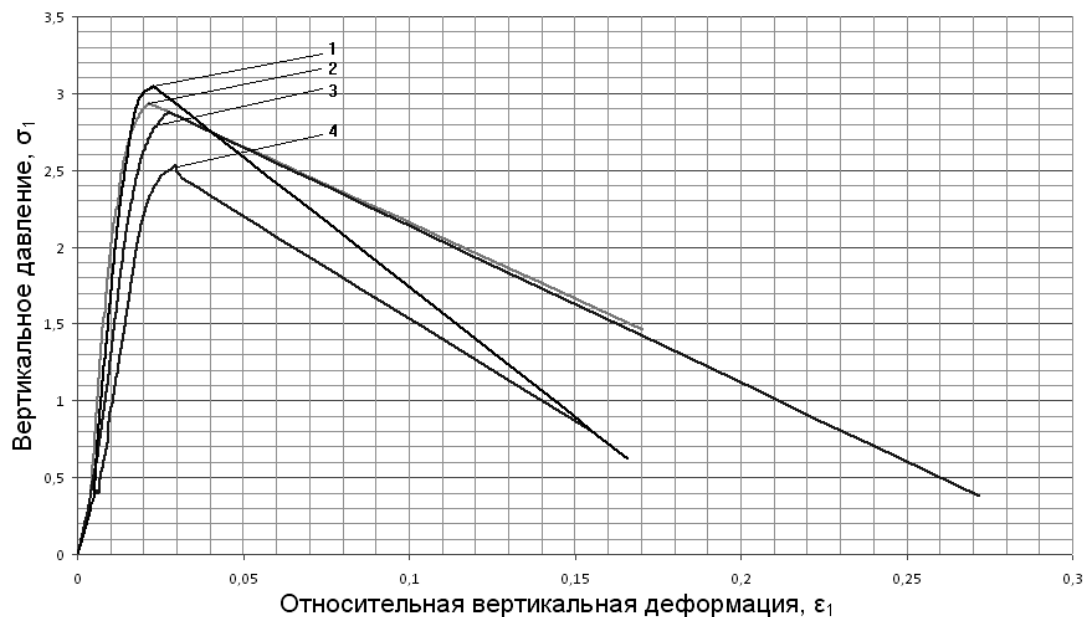


Рис. 20. Зависимость осевой деформации от осевого напряжения глиношлаковой смеси при постоянном боковом напряжении 400 кПа при 20 %-м содержании шлака на седьмые сутки твердения

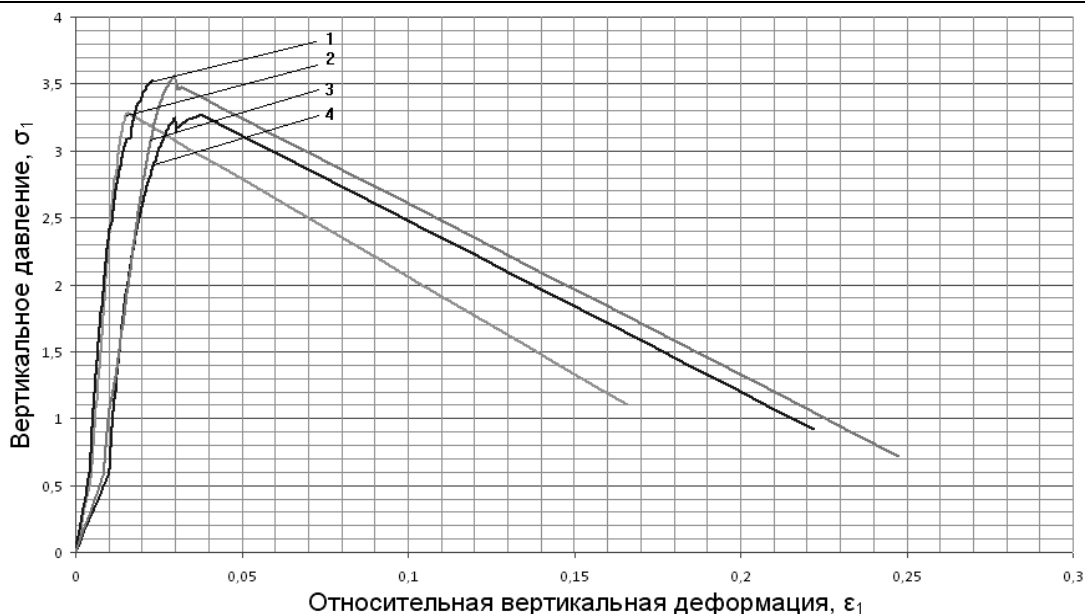


Рис. 21. Зависимость осевой деформации от осевого напряжения глиношлаковой смеси при постоянном боковом напряжении 600 кПа при 20 %-м содержании шлака на седьмые сутки твердения

Модуль упругости материала возрастает с ростом всестороннего давления. При давлении 200 кПа $E = 115,10$ МПа, а при давлении 600 кПа модуль упругости увеличивается до 342,15 МПа.

Сравнение результатов испытаний глиношлаковой смеси при 20 %-м содержании шлака в условиях одноплоскостного сдвига (см. рис. 14) и трехосного сжатия (рис. 22) показывает, что параметры прочности ϕ и c в данном случае практически не зависят от вида напряженного состояния. В условиях одноплоскостного сдвига $\phi_{direct} = 30^\circ$, $c_{direct} = 0,41$ МПа, а в условиях трехосного сжатия $\phi_{triax} = 29,81^\circ$, $c_{triax} = 0,47$ МПа.

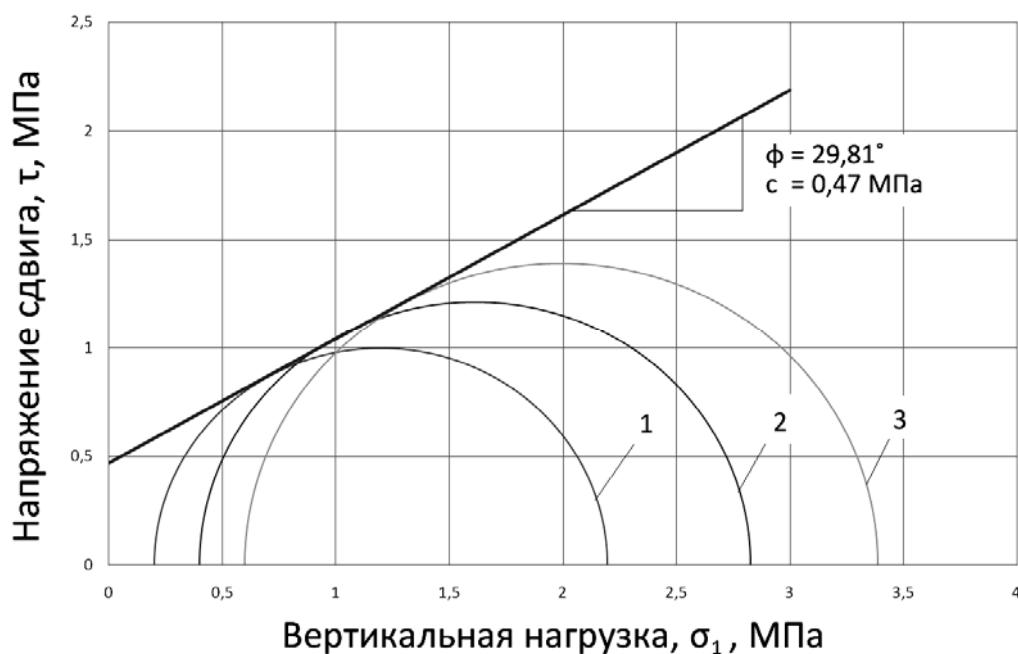


Рис. 22. Диаграмма Мора – Кулона:
1, 2, 3 – круги Мора, построенные по результатам испытаний, приведенным на рис. 19–21

Результаты экспериментальных исследований показывают, что характер деформационного поведения материала зависит от количества вяжущего. На начальном участке деформационное поведение материала практически не зависит от количества вяжущего и является линейным. При небольшом количестве вяжущего образцы разрушаются с пластическим деформированием без упрочнения материала. Увеличение содержания вяжущего приводит к изменению напряженно-деформированного поведения, материал не только деформируется с упрочнением, но и показывает так называемое послепиковое поведение с разупрочнением.

Результаты испытаний, приведенные в табл. 2, указывают на зависимость модуля упругости от метода испытаний или, точнее, от вида напряженного состояния, реализуемого при нагружении образцов материала. В условиях одноосного сжатия, когда возможна свободная деформация образца материала в горизонтальном направлении, модуль упругости (E_{uniax}) получается меньше [3], чем для того же материала, но при наличии бокового обжатия (E_{triax}). При этом значение модуля упругости в последнем случае возрастает с ростом величины бокового обжатия $\sigma_2 = \sigma_3$ с 96,68 до 342,15 МПа в выполненных исследованиях.

Т а б л и ц а 2

Механические свойства глинистого грунта в природном состоянии и глиношлакового композита при содержании шлака 20 % и времени твердения семь суток

Методы испытаний	Механические свойства глинистого грунта в природном состоянии					Механические свойства глиношлакового композита при содержании шлака 20 % и времени твердения семь суток			
						Максимальная прочность		Остаточная прочность	
Одноплоскостной срез по схеме КД	φ , град		c , кПа			φ , град	c , кПа	φ_{rest} , град	c_{rest} , кПа
	18,0		10,0			30,0	43,0	29,0	10,0
Трехосное сжатие по схеме КД	φ , град	c , кПа	E_{triax} , МПа, при σ_3			φ , град.	c , кПа	E_{triax} , МПа, при σ_3	
			100 кПа	200 кПа	300 кПа			200 кПа	600 кПа
	18,0	14,0	25,37	53,41	114,9 ₁	29,8	47,0	115,10	342,15

П р и м е ч а н и е : КД – консолидированно-дренированный сдвиг; E_{triax} – модуль упругости в условиях трехосного сжатия по траектории раздавливания.

Какой же модуль упругости необходимо рекомендовать для последующих расчетов строительных конструкций или оснований?

Применительно к проектированию оснований ответ на этот вопрос можно найти на рис. 23, где показана расчетная схема к определению начального напряженного состояния, т.е. значений вертикальных σ_v и горизонтальных σ_h напряжений в природном массиве грунта. Горизонтальные напряжения находят с использованием коэффициента бокового давления (K_0), значение которого, как правило, меньше единицы. Рассматриваемая расчетная точка представлена в виде прямоугольника и имитирует образец грунта. Наглядно видно, что образец не может свободно расширяться в горизонтальном направлении из-за наличия условий «стеснения» – бокового обжатия (σ_h) от окружающего грунта. При этом с ростом глубины h величина бокового обжатия возрастает линейно для случая однородного по глубине

грунта. Подобные условия нагружения можно реализовать только в условиях трехосного сжатия, но невозможно в условиях одноосного сжатия.

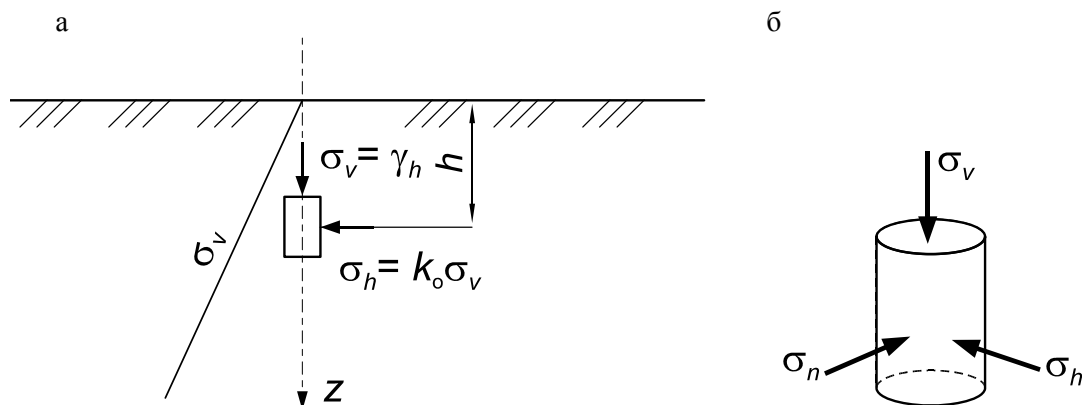


Рис. 23. Расчетная схема к определению начального напряженного состояния:
а – массив грунта; б – напряженное состояние в приборе трехосного сжатия

Модуль деформации (E_{oed}), определяемый из компрессионных испытаний [3], рекомендуется использовать [8] при расчете осадки уплотнения оснований фундаментов. Как видно из [3, табл. 11] и табл. 2, этот модуль зависит от величины нормального давления, возрастает с его ростом. Например, если в интервале давления 0,4–0,5 МПа компрессионный модуль деформации для природного грунта равен 5,1 МПа, то для закрепленного вяжущим грунта он возрастает до 42,34 МПа. Следует заметить, что определить компрессионный модуль деформации значительно проще и дешевле по сравнению с испытаниями в условиях трехосного сжатия. Поэтому на практике проводят массовые испытания образцов в условиях компрессионного сжатия, а за расчетное значение принимают величину модуля деформации, используя выражение (13) [3]. При этом в условиях трехосного сжатия проводят не более трех испытаний для каждой разновидности грунтов с целью определения E_{triax} .

В большинстве случаев при нахождении предельной нагрузки в сыпучем и связном основаниях используется условие прочности Мора – Кулона (1), для чего необходимо определить параметры φ и c , входящие в условие прочности. Эти же параметры используются и в других условиях прочности, например Друкера – Прагера [9]. Поэтому, если требуется выполнить расчеты с учетом упругопластического поведения материала, то при использовании отмеченных ранее условий прочности следует определить параметры прочности φ и c . В качестве начального упругого модуля деформации рекомендуется принимать E_{triax} .

Может оказаться, что при решении упругопластических задач с неассоциированным законом течения при определении предельной нагрузки потребуются дополнительные параметры, например угол дилатансии, управляющий объемным поведением материала при сдвиге. Угол дилатансии ψ можно найти из испытаний материала в условиях трехосного сжатия. С небольшой погрешностью его можно определить из простого выражения

$$\psi = \varphi - \varphi_{rest}, \quad (4)$$

где φ – угол внутреннего трения, найденный при максимуме девиатора напряжений; φ_{rest} – остаточный угол внутреннего трения, найденный при минимальных значениях девиатора напряжений.

Условия прочности Мора – Кулона и Друкера – Прагера, как, впрочем, и другие условия прочности, не рассмотренные в данной работе, позволяют оценивать поведение материалов в области не только сжимающих, но и растягивающих напряжений.

Для этого надо знать только прочность материала на растяжение. Для практических целей при выборе расчетного значения прочности на растяжение следует использовать результаты испытаний на прямое растяжение, так как в испытываемом образце возникает более однородное напряженное состояние по сравнению с методами растяжения при раздавливании и растяжения при изгибе [10].

Коэффициенты интенсивности напряжений используются при оценке возможности зарождения и развития трещин в упругой среде. В частности, в программе ANSYS имеется модуль, который выполняет расчеты конструкций с использованием коэффициентов интенсивности напряжений.

В ы в о д ы :

1. Испытания в условиях трехосного сжатия предпочтительны по сравнению с общепринятыми испытаниями в условиях одноосного сжатия, так как в реальности в любой точке проектируемой конструкции действует не только наибольшее главное напряжение σ_1 , но и главные напряжения $\sigma_2 = \sigma_3$, и материал испытывает «стеснение» при его деформировании.

2. Величины деформации сдвига оказывают влияние на параметры прочности. При деформации сдвига от 4–5 % мы имеем максимум прочности и параметры прочности в 30° и 0,43 МПа, а при деформации сдвига в 13 % получаем практически тот же угол внутреннего трения $30\text{--}29^\circ$ и падение сил сцепления почти в четыре раза (с 0,43 до 0,1 МПа). Это объясняется полным разрушением структурных (цементационных) связей в глинистом композите при практически той же площади контактов между частицами материала.

3. Введение шлакощелочного вяжущего в естественный грунт приводит к изменению характера зависимости «касательное напряжение – деформация сдвига». Если для естественного грунта (см. рис. 7, 8) имеет место упрочнение материала с небольшим разупрочнением после достижения предела прочности, то для грунта с введением вяжущего наблюдается разупрочнение материала до остаточного значения (см. рис. 12, 13).

4. Введение шлакощелочного вяжущего в естественный грунт приводит к изменению параметров, входящих в условие прочности Кулона. Если для грунта в природном состоянии $\varphi = 18^\circ$, $c = 0,005\text{--}0,01$ МПа, то введение 20 % шлака приводит к их значительному увеличению: $\varphi = 30^\circ$, $c = 0,43$ МПа. Силы удельного сцепления возрастают в 40–43 раза.

Список литературы

1. ГОСТ 12248.1–2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза.
2. ГОСТ 12248.3–2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия.
3. Болдырев, Г.Г. Испытания глиношлаковых композитов в условиях одноосного и компрессионного сжатия / Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов, Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63). – С.5–23.
4. Патент 64310 Российская Федерация, МКПО 10-05. Устройство одноплоскостного среза СППА-40/35-10 / Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов, Е.Г. Болдырева; заявитель и патентообладатель ООО «Геотек». – № 2006503659; заявл. 15.11.06; опубл. 16.10.07.
5. Патент 66389 Российская Федерация, МКПО 10-04. Устройство одноплоскостного среза СПКА-40/35-25 (два варианта) / Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов, Е.Г. Болдырева; заявитель и патентообладатель ООО «Геотек». – № 2006504276; заявл. 18.12.06; опубл. 16.05.08.
6. Патент 85167 Российская Федерация, МПК G01N 3/08 E02D 1/00. Устройство трехосного сжатия / Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов, Е.Г. Болдырева; заявитель и

патентообладатель ООО «НПП «Геотек». – № 2009118154; приоритет 13.05.09; опубл. 27.08.09.

7. Патент 64648 Российская Федерация, МКПО 10-04. Устройство трехосного сжатия СТП-80/38 / Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов, Е.Г. Болдырева; заявитель и патентообладатель ООО «Геотек». – № 2006504282; приоритет 25.12.06; опубл. 16.11.07.

8. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – Москва : Госстрой России, 2016. – 228 с.

9. Chin Kheng Ghee. Constitutive behavior of cement treated marine clay: PhD thesis / Chin Kheng Ghee. – Singapore : National University of Singapore, 2006. – 222 p.

10. Технологическая механика закрепления и оценки качества глинистых грунтов : моногр. / И.Х. Идрисов, Н.И. Макридин. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 174 с.

References

1. GOST 12248.1–2020. Soils. Determination of strength characteristics by the single-plane section method.

2. GOST 12248.3–2020. Soils. Determination of strength and deformability characteristics by the three-axis compression method.

3. Boldyrev, G.G. Tests of clay-slag composites in conditions of uniaxial and compression compression / G.G. Boldyrev, I.Kh. Idrisov, N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Regional architecture and construction. – 2025. – № 2 (63). – P. 5–23.

4. Patent 64310 Russian Federation, ICPO 10-05. The device of a single-plane section of the SPP-40/35-10 / G.G. Boldyrev, I.Kh. Idrisov, E.G. Boldyreva; applicant and patent holder of ООО Geotek. – No. 2006503659; application no. 11.15.06; publ. 16.10.07.

5. Patent 66389 Russian Federation, ICPO 10-04. Single-plane cutting device SPKA-40/35-25 (two variants) / G.G. Boldyrev, I.Kh. Idrisov, E.G. Boldyreva; applicant and patent holder ООО «Геотек». – No. 2006504276; application dated 12.18.06; published on 05.16.08.

6. Patent 85167 Russian Federation, IPC G01N 3/08 E02D 1/00. Three-axis compression device / G.G. Boldyrev, I.Kh. Idrisov, E.G. Boldyreva; applicant and patent holder of ООО NPP Geotek. – No. 2009118154; priority 13.05.09; publ. 27.08.09.

7. Patent 64648 Russian Federation, ICPO 10-04. Triaxial compression device STP-80/38 / G.G. Boldyrev, I.Kh. Idrisov, E.G. Boldyreva; applicant and patent holder of ООО Geotek. – No. 2006504282; priority 25.12.06; published 16.11.07.

8. SP 22.13330.2016. Foundations of buildings and structures. – Moscow : Gosstroy of Russia, 2016. – 228 p.

9. Chin Kheng Ghee. Constitutive behavior of cement treated marine clay: PhD thesis / Chin Kheng Ghee. – Singapore : National University of Singapore, 2006. – 222 p.

10. Technological mechanics of fixing and assessing the quality of clay soils: monographs / I.Kh. Idrisov, N.I. Makridin. – Penza : PGUAS, 2014. – 174 p.

УДК 666.691:669.86

DOI 10.54734/20722958_2025_3_43

Самарский государственный
экономический университетРоссия 443090, г. Самара,
ул. Советской Армии, 141**Абдрахимов Владимир Закирович**,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Землеустройство и экология»
E-mail: 3375892@mail.ru

Samara State University of Economics

Russia, 443090, Samara, 141,
Sovetskaya Armiya St.**Abdrakhimov Vladimir Zakirovich**,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Land Management and
Ecology»
E-mail: 3375892@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ФОСФОРНОГО ШЛАКА НА ПОРИСТОСТЬ КЛИНКЕРНОГО КИРПИЧА НА ОСНОВЕ ОТХОДА ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

В.З. Абдрахимов

Получен клинкерный кирпич на основе ГЦИ (глинистой части «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд) и фосфорного шлака без вовлечения естественных традиционных ресурсов. Методом сравнения интегральных и дифференциальных порограмм было выявлено, что пор «опасных» с радиусом от 10^{-5} до 10^{-7} м в образцах состава без применения фосфорного шлака – 52 %, а в оптимальном составе, содержащем 30 % фосфорного шлака, – 41 %.

Ключевые слова: клинкерный кирпич, фосфорный шлак, ГЦИ, ртутная порометрия, «опасные» поры

THE EFFECT OF PHOSPHOROUS SLAG ON THE POROSITY OF CLINKER BRICKS BASED ON NON-FERROUS METALLURGY WASTE

V.Z. Abdrakhimov

Clinker bricks based on HCI (the clay part of the gravity «tails» of zircon-ilmenite ores) and phosphoric slag were obtained without the use of natural traditional materials. By comparing integral and differential porograms, it was revealed that there was 52 % the pores of «dangerous» with a radius from 10^{-5} to 10^{-7} m in samples of the composition without the use of phosphoric slag, and – 41 % in the optimal composition containing 30 % of phosphoric slag.

Keywords: clinker brick, phosphorus slag, GCI, mercury porosimetry, "dangerous" pores

Введение

Пористость. К индивидуальным свойствам, которые определяют химические, физико-механические и технические показатели керамических материалов, следует отнести структуру пористости изделий [1–3]. Определение «структура пористости» чаще всего находит применение для характеристики количества различных пор, дифференциации их по размерам, строению с учетом форм (морфологии), различной извилистости закрытых, открытых каналов, их шероховатости и т.д. [4–6].

Структура керамического черепка зарождается в результате обжига и определяется взаимосвязями трех фаз: *кристаллической* (твердые растворы, химические соединения, образовавшиеся в результате реакций, конгломераты, образовавшиеся в результате уплотнения черепка, единый монолит); *стекловидной* (жидкая фаза; образуется прослойками между кристаллическими фазами и служит связующим компонентом); *газовой* (в порах керамического черепка содержатся газы, причем поры понижают некоторые показатели изделия, если они открытые, например, при попадании в них влаги) [6–9].

Изучению и анализу пористости уделено масштабное число публикаций, однако исследования совокупности пор с их дифференциацией по размерам пока не дали удовлетворительных результатов [1, 8]. Смысл большинства исследований пористости керамических материалов в основном ограничивался анализом строения и формы пор: изометрические, щелевидные, овальные с оценкой взаимозависимости различных типов пор в изделиях [1, 8–11].

В настоящее время масштабное число научных публикаций по анализу пористости позволило сформулировать и выделить разнотипные группы пор и пористости, которые изучались с учетом различных параметров и свойств пористых структур, но тем не менее общепринятой для пористости классификации пока нет [1, 12, 14–16]. Для керамических материалов поры размером от 10^{-6} до 10^{-7} м можно отнести к «опасным», так как с такими порами изделия не обладают высокой морозостойкостью [12, 17–19].

Клинкерный кирпич. Керамический кирпич, обладающий низкой открытой пористостью, относительно высокими плотностью, прочностью и морозостойкостью, допускается к использованию в чрезвычайных погодных условиях (от трескучих морозов до самых высоких температур на планете) и называется – клинкерный кирпич [20, 21].

Клинкерный кирпич – это устойчивое каменное изделие определенной формы с большим сроком службы, созданное из тугоплавких глин с добавками отошителей и интенсификаторов спекания (для снижения температуры обжига), термообработанное при температурах 1200–1250°C без поверхностного остекловывания с водопоглощением менее 6 %.

С учетом того что в течение определенного времени проводятся ремонты, реставрации для ликвидации дефектов и обновления зданий, стоимость стены из кирпича клинкерного, за счет снижения количества текущих ремонтов, гораздо дешевле (в 2–4 раза) по сравнению со стеной из обыкновенного рядового керамического кирпича [20, 21].

Цель работы – выявить фактор воздействия фосфорного шлака, содержащего 70 % стеклофазы, как отошителя и интенсификатора спекания на структуру пористости клинкерного кирпича.

Методика исследования

Поэлементный состав и микроструктуру сырьевых материалов изучали с помощью микроскопа фирмы Jeol. Япония – JSM 6390A, петрографические анализы получены с применением аншлифов, шлифов, иммерсионных жидкостей и микроскопов МИН-7 и Nu-2E. Размеры частиц сырьевых материалов определяли металлографическим анализом с использованием микроскопа МИН-8М при увеличении в 200 раз.

Сегрегацию пор по размерам анализировали по методу вдавливания ртути в образец на порометрической установке П-3М, такая методика называется ртутной порометрией [3, 4, 8, 18, 22, 24].

Определяли диаметр пор: $D_{\text{экв}} = (4\sigma \cos\theta)/P$, где σ – поверхностное натяжение ртути; θ – краевой угол смачивания; P – внешнее давление. Для силикатных изделий и ртути при определении $D_{\text{экв}}$ принимали конкретные показатели ртути: $\sigma = 471,6$ дин/см²; $\theta = 145^\circ$ ($\cos 145^\circ = 0,8192$); плотность $\rho = 13,546$ г/см³ при 20 °С. Основные технические свойства клинкерного кирпича определяли согласно требованиям ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия».

Экспериментальная часть

Для получения клинкерного кирпича использовались ГЦИ (глинистая часть «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд) в качестве тугоплавкой глины и фосфорный шлак, содержащий 70 % стеклофазы, в качестве отошителя и интенсификатора спекания.

Химические составы сырьевых материалов: усредненный оксидный и поэлементный соответственно приведены в табл. 1 и 2, фракционный – в табл. 3, минеральный – на рис. 1, огнеупорность – в табл. 4, металлографический анализ – на рис. 2, микроструктура (электронное фото) – на рис. 3.

Т а б л и ц а 1

Усредненный химический оксидный состав техногенного сырья

Компонент	Содержание оксидов, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	R ₂ O	П.п.п.
1. ГЦИ	59,59	22,43	6,74	1,28	1,54		1,58	7,04
2. Фосфорный шлак	43,42	3,81	1,04	46,58	2,48	1,8	0,87	-

П р и м е ч а н и е : п.п.п. – потери при прокаливании; R₂O=K₂O+Na₂O

Т а б л и ц а 2

Поэлементный химический состав техногенного сырья

Компонент	Содержание элементов, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	P
1. ГЦИ	2,18	51,26	0,26	0,54	15,45	24,8	0,32	0,32	4,87	-
2. Фосфорный шлак	-	54,70	0,32	2,94	2,09	18,05	0,30	20,34	0,52	0,74

Т а б л и ц а 3

Фракционный состав техногенного сырья

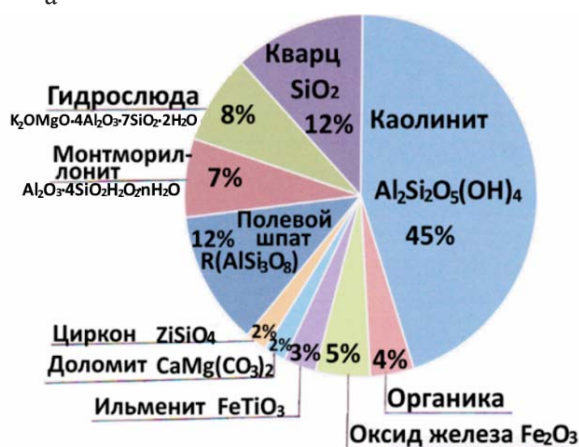
Компонент	Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
	>0,063	0,063-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
1. ГЦИ	0,8	8,1	12,1	21,0	58
2. Фосфорный шлак	15,3	31,3	34,8	13,4	5,2

Т а б л и ц а 4

Огнеупорность техногенного сырья

Компонент	Огнеупорность, °C		
	начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
1. ГЦИ	1400	1450	1580
2. Фосфорный шлак	1300	1320	1350

а



б

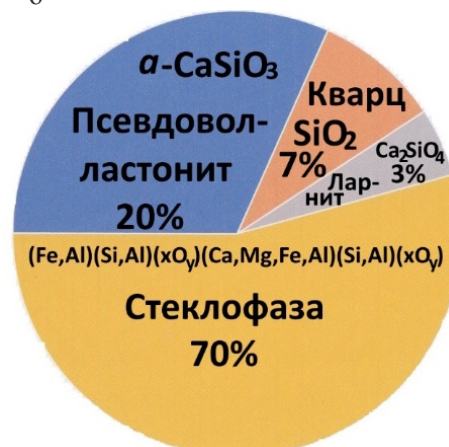


Рис. 1. Минеральный состав техногенного сырья:

а – ГЦИ; б – фосфорный шлак

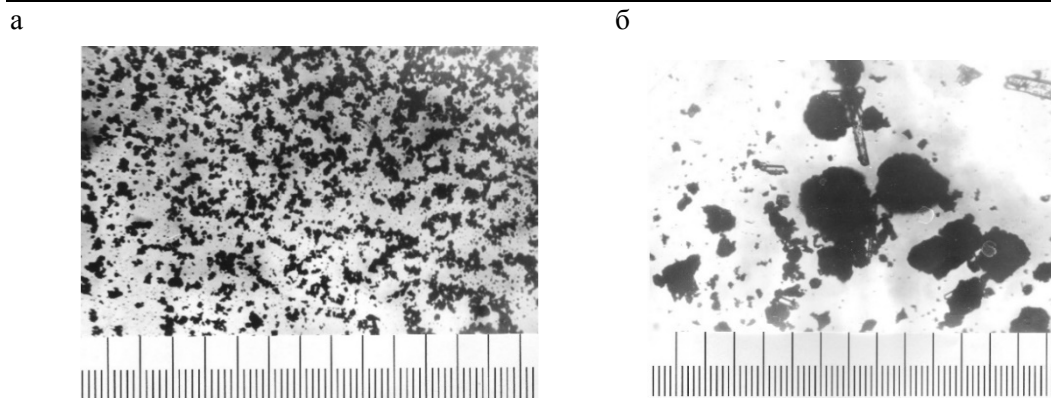


Рис. 2. Металлографический анализ техногенного сырья:
а – ГЦИ; б – фосфорный шлак

ГЦИ образуется мокрогоравитационным способом обогащения металлургической руды методом отделения ее от тугоплавкой глины [26]. Тугоплавкая глина, благодаря мокрогравитационному способу, становится однородным сырьем по ключевым составам: химическому, минеральному и фракционному. ГЦИ по содержанию Al_2O_3 – полукислое сырье, а по пластичности (число пластичности 21-23) – среднепластичное. Исследуемый сырьевой компонент достаточно хорошо описан в работах [2, 8, 10, 26].

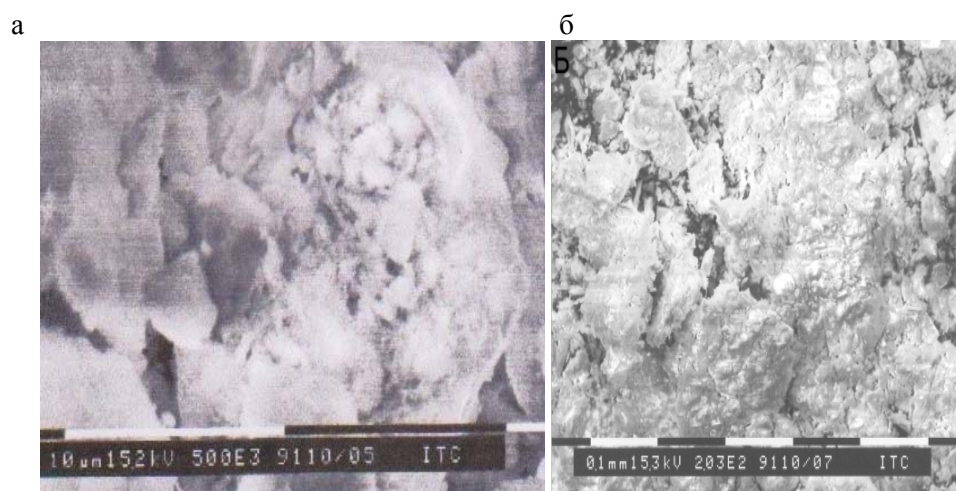


Рис. 3. Микроструктура сырьевых компонентов:
а – ГЦИ; б – фосфорный шлак. Увеличение: а – $\times 1000$; б – $\times 5000$

Фосфорный шлак отождествлялся с техногенным сырьем производства фосфора, образовавшегося в герметизированной дуговой печи термическим способом при температуре 1300–1500°C в результате химического процесса. Основные (базовые) показатели шлака представлены в табл. 1–4, рис 1–3 и достаточно хорошо изучены [25, 27, 28].

Получение клинкерного кирпича. Производили клинкерный кирпич из составов, представленных в табл. 5, по хорошо известной традиционной технологии (возрастом более 5000 лет), которая описана во многих работах [20, 21, 25, 26]: диспергирование сырьевых материалов (измельчение), их перемешивание (гомогенизация), пластическое формование образцов, сушка и обжиг.

Т а б л и ц а 5

Составы экспериментальных масс и пластичность

Компонент	Содержание компонентов, мас. %			
	1	2	3	4
ГЦИ	100	70	60	50
Фосфорный шлак	-	30	40	50
Пластичность шихты, безразмерная единица	22	17	11	8

В табл. 6 приведены технические показатели клинкерного кирпича при температуре обжига 1200°C.

Т а б л и ц а 6

Технические показатели клинкерного кирпича

Показатели	Составы				Требования ГОСТа 530-2012
	1	2	3	4	
1. Водопоглощение, %	6,4	5,2	4,4	2,8	Менее 6 %
2. Морозостойкость, циклы	38	82	98	110	Более 75
3. Предел прочности при сжатии, МПа	48,5	54,7	68,9	71,8	-
4. Предел прочности при изгибе, МПа	8,4	13,7	18,4	20,2	Более 4,4
5. Кислотостойкость, %	94,4	96,4	97,7	98,2	Не менее 95 %,
6. Вспучивающие включения общей площадью, %	Менее 1,0	Менее 1,0	Менее 1,0	Более 5 %	Не более 1,0 % площади вертикальных граней изделия

На рис. 4 представлены зависимости пористости образцов из составов №1 (состав без отошителя, взятый для сравнения) и №3 (оптимальный состав), на рис. 5 – порограммы исследуемых образцов из составов №1 и №3.

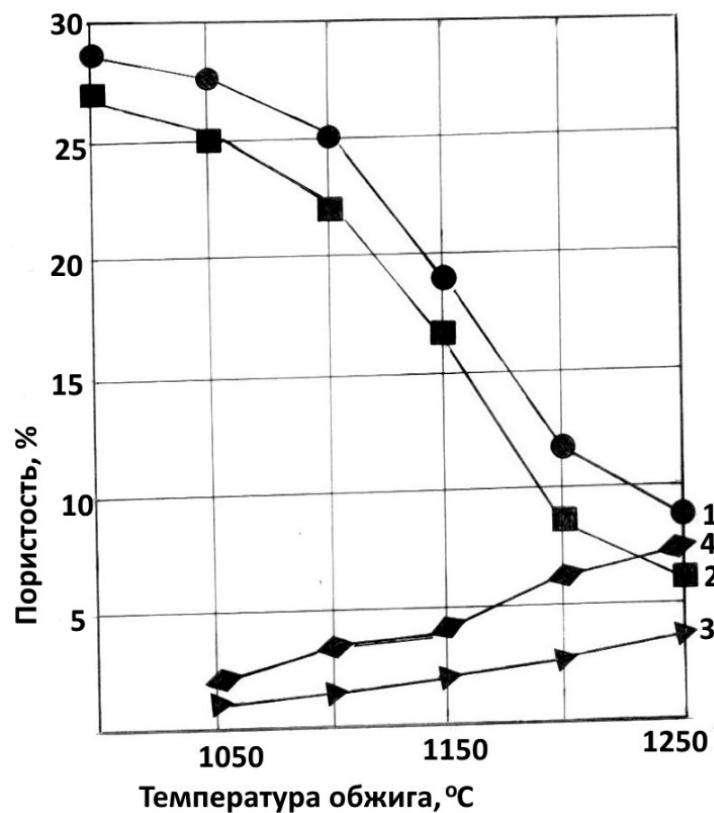
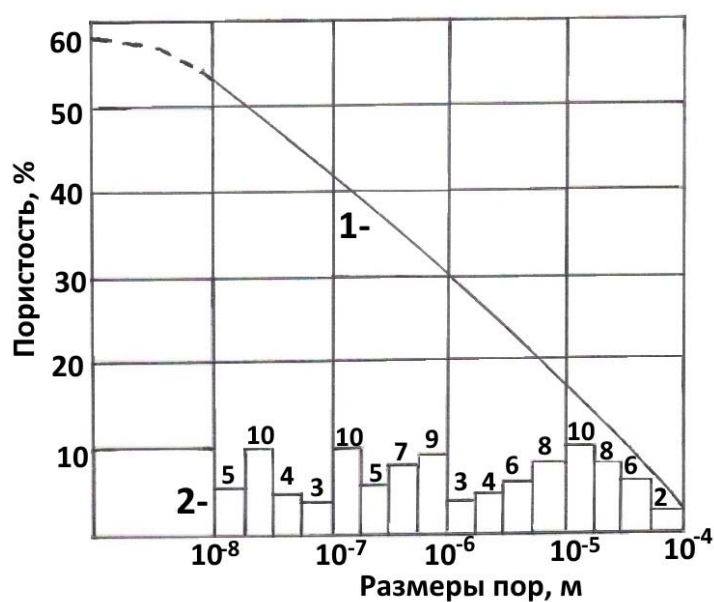


Рис. 4. Зависимость пористости от температуры обжига:

1 – открытая пористость состава №1; 2 – открытая пористость состава №3;
3 – закрытая пористость состава №1; 4 – закрытая пористость состава №3

а



б

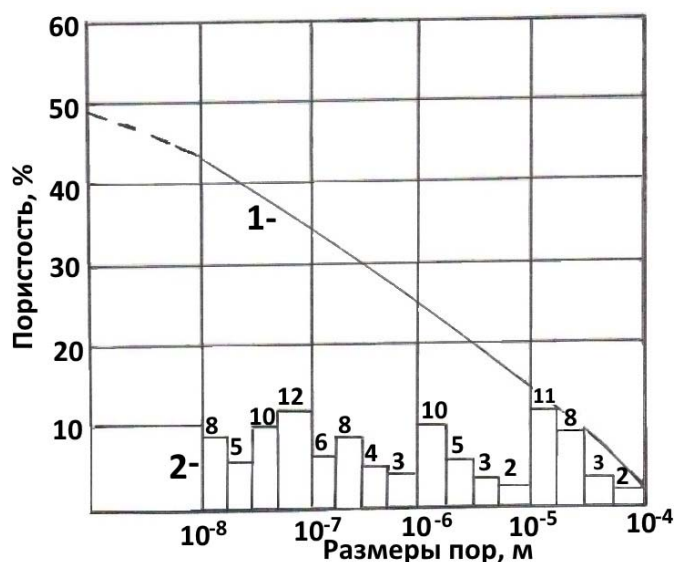


Рис. 5. Порограммы исследуемых образцов из составов №1 и №3, обожженных при температуре 1200°C:

а – состав №1; б – состав №3;

1 – интегральные порогаммы (сумма объема пор);

2 – дифференциальные порогаммы (% содержание пор по радиусу)

Обсуждение результатов

В табл. 6 показано, что образцы из составов №1 и №4 неадекватны запросам ГОСТа по морозостойкости и кислотостойкости, а образцы состава №4 – по вспучиванию включений площадью более 1 %. Утилизация фосфорного шлака в количестве 50 % заметно реагирует на вспучивание клинкерного кирпича. Произведенные из составов №2 и №3 клинкерные кирпичи гармонируют с нормами ГОСТа, но предпочтительным составом следует считать состав №3.

Используемый в керамических композициях фосфорный шлак от 30 до 50 % снижает число пластичности с 17 до 8 (см. табл. 5), поэтому при изготовлении клинкерных образцов из композиции, обладающей пластичностью не более 8, на изделиях образуются мелкие трещины, которые при сушке и обжиге заметно проявляются.

Изучение рис. 4 обнаруживает, что с ростом термообработки с 1000 до 1200 °С кардинально снижается открытая пористость в образце состава №1 с 28 до 8 %, а в образцах состава №3 – с 26,5 до 6 %. При температуре 1050°С начинают формироваться поры закрытого типа в образцах состава №1 – 2 %, а в образцах состава №3 – 5 %, рост которых при температуре 1250°С для состава №1 равен 4 %, а для №3 – 7 %.

Возрастание закрытой пористости реализуется в основном за счет снижения открытой пористости в результате затекания жидкой фазы в открытые поры и закупоривания их, что приводит к более плотной упаковке клинкерного кирпича.

Для исследуемых образцов полученные способом ртутной порометрии порограммы интегральной и дифференциальной направленности запечатлены на рис. 5. Интегральные порограммы зафиксировали, что объем микропор величиной от 10^{-4} до 10^{-8} м в образцах состава №1 составляет 0,158, а в составе №3 – 0,148 см³/г. Дифференцированная порограмма показала разделение пор по размерам в образцах состава №1, %: 10^{-4} – 10^{-5} м – 26; 10^{-5} – 10^{-6} м – 21; 10^{-6} – 10^{-7} м – 31; 10^{-7} – 10^{-8} м – 22, а в образцах состава №3, %: 10^{-4} – 10^{-5} м – 24; 10^{-5} – 10^{-6} м – 20; 10^{-6} – 10^{-7} м – 21; 10^{-7} – 10^{-8} м – 35.

Для керамических материалов особенно нежелательными, по мнению М.К. Гальпериной, являются малокапиллярные поры с радиусом от 10^{-5} до 10^{-7} м [12, 29, 30]. Гальперина М.К. этого вида поры именует «опасными», так как именно они делают изделия неморозостойкими.

Процентное содержание «опасных» пор в образцах состава №1 – 52 %, а в образцах состава №3 – 41 % (см. рис. 5). В микропорах керамических материалов величиной $<10^{-7}$ м (0,1 мкм) находится связанная вода, не переходящая в лед до -70°С, поэтому поры такой величины не приносят особого вреда физико-механическим и химическим показателям [13] изделий. Процентное содержание именно «безопасных» пор в образцах составов №1 и №4 соответственно равно 22 и 35 % (см. рис. 5, а, б).

Резервные микропоры (размер 10^{-4} – 10^{-5} м) группируются в сегмент «безопасных» пор, в которых хотя и концентрируется влага, но задержаться ей не удастся [30–32]. Содержание таких пор, как показали исследования, в образцах составов №1 и №3 соответственно равно 26 и 24 % (см. рис. 5, а, б).

Взаимно соединяющиеся поры с диаметром более 10^{-4} м (200 мкм и выше) интерпретируются как «опасные» [29–31]. Авторы работ [12, 29, 30] микропоры размером 10^{-6} – 10^{-7} м также оценивают как «опасные», которых в образцах состава №3 гораздо меньше, чем в составе №1, их содержание соответственно равно 31 и 21 % (см. рис. 5, а, б).

Выводы

1. Установлено, что без фосфорного шлака, выполняющего роль отошителя и интенсификатора спекания, получить клинкерный кирпич при температуре обжига 1200°С невозможно.

2. Введение в состав керамической массы 50 % фосфорного шлака, содержащего 70 % стеклофазы, способствует образованию на поверхности вспучивающих включений общей площадью более 10 %, что не соответствует требованию ГОСТа.

3. Установлено, что использование фосфорного шлака в количестве 30–40 % благоприятствует получению клинкерного кирпича, соответствующего требованию ГОСТа по всем показателям, при этом оптимальным составом является состав, содержащий 30 % шлака.

4. Методом сравнения интегральных и дифференциальных порограмм было выявлено, что пор «опасных» с радиусом от 10^{-5} до 10^{-7} м в образцах состава без применения отошителя – 52 %, а в оптимальном составе, содержащем 30 % отошителя, – 41 %.

5. Установлено, что в образцах, не имеющих в своем составе отошителя, отмечается невысокое содержание безопасных микропор (10^{-7} – 10^{-8} м), а в образцах, имеющих отошитель, – повышенное, что соответственно составляет 22 и 35 %. Микропоры размером 10^{-4} – 10^{-5} м также оцениваются как «безопасные», содержание которых в образцах с отошителем повышенное и составляет 24 %, а без отошителя – 26 %.

Список литературы

1. Kairakbaev, A.K. Mossbauer Spectroscopy Study of the Iron Oxides, Phase Composition, and Porosity Structure in Ceramic Brick Based on Intershale Clay and Lignite Slag / A.K. Kairakbaev, V.Z. Abdrakhimov, E.S. Abdrakhimova // *Glass and Ceramics*. – 2019. – Vol. 76, №1–2. – P. 56–62.
2. Абдрахимова, Е.С. Влияние температурно-газовой среды обжига на формирование пористой структуры кислотоупоров / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // *Новые огнеупоры*. – 2016. – №1. – С. 56–61.
3. Фандеев, В.П. Методы исследования пористых структур / В.П. Фандеев, К.С. Самохина. – DOI: 10.15862/34TVN415 // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Т. 7, №4. – С. 2–12. – URL: <http://dx.doi.org/10.15862/34TVN415>.
4. Абдрахимова, Е.С. Кинетика структуры пористости в процессе обжига самарских легкоплавких глин различного химико-минералогического состава / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2009. – Т. 11, №5. – С. 32–40.
5. Смолин, А.Ю. Зависимости механических свойств керамики с бимодальным распределением пор по размерам от пористости на разных масштабных уровнях / А.Ю. Смолин, Г.В. Еремина, С.Ю. Коростелев // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2019. – Т. 62, № 8. – С. 128–136. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000674590>
6. Кудрявцев, П.Г. Структура пор в твердых пористых телах. Часть I / П.Г. Кудрявцев. – DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-80-103](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-80-103) // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2018. – Т. 10, № 5. – С. 80–103.
7. Курмангалиева, А.И. Формирование пористых структур в технологии производства строительных материалов на основе строительного гипса / А.И. Курмангалиева, Л.А. Аниканова, А.И. Кудяков, А.Б. Стешенко, А.Ф. Бурьянов, Н.А. Лукьянова, А.С. Иноземцев, С.С. Иноземцев // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 319–327. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-319-327>.
8. Егоров, А.А. Оценка параметров фрактальных пористых сред / А.А. Егоров, Д.А. Быковских, Т.В. Гавриленко. – DOI: 10.26117/2079-6641-2020-30-1-87-96 // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. – 2020. – Т. 30 № 1. – С. 87–96.
9. Миронова, Е.В. Влияние модифицированного сырца кварцевой керамики на спекание / Е.В. Миронова, Д.В. Харитонов, А.А. Анашкина. – DOI: 10.23670/IRJ.2022.115.1.008 // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2022. – №1 (115). – С. 48–51.
10. Абдрахимов, В.З. Влияние высокоглиноземистых отходов нефтехимии на структуру пористости кислотоупоров / В.З. Абдрахимов, В.К. Семенычев // *Новые огнеупоры*. – 2010. – №9. – С. 148–151.
11. Кислицын, А.А. Исследование распределения пор по размерам в пористой среде с помощью ядерного магнитного резонанса / А.А. Кислицын, А.Г. Потапов // *Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 52–59.
12. Гальперина, М.К. Изменение пористой структуры фасадных плиток при испытании их на морозостойкость / М.К. Гальперина, В.М. Егоров // *Тр. ин-та НИИстройкерамики*. – 1985. – Вып. 56. – С. 71–82.
13. Салахов, А.М. Поры и прочностные характеристики строительных материалов / А.М. Салахов, Л.Р. Тагиров, Р.А. Салахова // *Строительные материалы*. – 2011. – №12. – С. 25–28.
14. Федяев, В.Л. Влияние пористости технических материалов на их прочностные свойства / В.Л. Федяев, Э.Р. Галимов, А.В. Беляев, Л.В. Сироткина. – DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-28-35 // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2023. – № 2 (156). – С. 28–35. – EDN: GTJXGR
15. Кудрявцев, П.Г. Основные пути создания пористых композиционных материалов / П.Г. Кудрявцев. – DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-5-256-269 // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2020. – Т. 12, № 5. – С. 256–269.
16. Тогжанов, И.А. Исследование пористости кирпича / И.А. Тогжанов, В.З. Абдрахимов // *Известия вузов. Строительство*. – 2001. – №6. – С. 44–47.

17. Хасанов, Д.И. Исследование масштабного эффекта и понятия элементарного представительного объема горных пород применительно к пористости. / Д.И. Хасанов, М.А. Лоншаков. – DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.55-69> // Георесурсы. – 2020. – №4. – С. 55–69.
18. Абдрахимов, В.З. Влияние температурно-газовой среды обжига на формирование пористой структуры керамики / В.З. Абдрахимов, Д.Ю. Денисов, И.В. Ковков, Е.С. Абдрахимова // Известия вузов. Строительство. – 2006. – №10. – С. 79–84.
19. Алымов, М.И. Расчет внутреннего давления в цилиндрической поре / М.И. Алымов, С.И. Аверин, А.Б. Анкудинов // Перспективные материалы. – 2022. – №12. – С. 76–81. – URL: <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2022-12-76-81>
20. Абдрахимов, В.З. Рециклинг межсланцевой глины и шлака от выплавки ферротитана в производстве клинкерного кирпича / В.З. Абдрахимов. – DOI: 10.52409/20731523_2023_2_40 // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – №2. – С. 40–43.
21. Котляр, В.Д. Особенности свойств, применение и требования к клинкерному кирпичу / В.Д. Котляр, Ю.В. Терехина, А.В. Котляр // Строительные материалы. – 2015. – №4. – С. 72–74.
22. Собина, Е.П. Разработка стандартных образцов пористости на основе оксида алюминия для метода ртутной порометрии / Е.П. Собина // Эталоны. Стандартные образцы. – 2019. – №15(4). – С.13–24. – URL: <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2019-15-4-13-24>
23. Собина, Е.П. Совершенствование эталонного комплекса для метрологического обеспечения порометрии твердых веществ и материалов / Е.П. Собина. – DOI 10.20915/2077-1177-2018-14-1-2-9-23 // Стандартные образцы. – 2018. – Т. 14, № 1–2. – С. 9–23.
24. Распределение пор по размерам и пористость твердых материалов методом ртутной порометрии и газовой адсорбции. Часть 2: Анализ нанопор методом газовой адсорбции: международный стандарт. ISO 15901-2-2022 Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption – Part 2: Analysis of nanopores by gas adsorption. Дата принятия 01 января 2022.
25. Абдрахимов, В.З. Влияние фосфорного шлака на технические показатели и фазовый состав керамического кирпича / В.З. Абдрахимов. – DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.2 // Известия КГСУ. – 2024. – №3(69). – С. 15–26.
26. Абдрахимов, В.З. Рециклинг отходов металлургии в производстве кислотоупоров без применения традиционного природного сырья / В.З. Абдрахимов. – DOI: 10.54734/20722958_2024_4_54 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №4. – С. 54–62.
27. Сулейменов, Ж.Т. Высокопрочная стеновая керамика на основе фосфорного шлака и бентонитовой глины / Ж.Т. Сулейменов, А.А. Сагындыков, Ж.Н. Молдамуратов, Г.М. Баялиева, Ж.Б. Алимбаева // Нанотехнологии в строительстве. – 2022. – Т. 14, № 1. – С. 11–17. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-11-17>.
28. Грызлов, В.С. Электротермофосфорные шлаки на основе вяжущих композитов / В.С. Грызлов, А.И. Фоменко, Н.М. Федорчук, Н.С. Бусыгин, Х.Х. Тургумбаева, Т.И. Бейсекова, И.З. Лапшина // Строительные материалы. – 2014. – №10. – С. 66–68.
29. Гальперина, М.К. К вопросу о структуре пористости керамических изделий / М.К. Гальперина // Тр. ин-та / НИИстройкерамики. – 1981. – С. 58–61.
30. Гальперина, М.К. Кинетика изменения структуры пористости в процессе обжига глины различного минералогического состава / М.К. Гальперина, Л.В. Ерохина // Тр. ин-та / НИИстройкерамики. – 1981. – Вып. 45. – С. 3–18.
31. Абдрахимов, В.З. Определение структуры пористости кислотоупоров на основе отходов цветной металлургии методами ртутной порометрии и диффузного РМУ / В.З. Абдрахимов // Новые огнеупоры. – 2024. – №11. – С. 50–56.

References

1. Kairakbaev, A.K. Mossbauer Spectroscopy Study of the Iron Oxides, Phase Composition, and Porosity Structure in Ceramic Brick Based on Intershale Clay and Lignite

Slag / A.K. Kairakbaev, V.Z. Abdrakhimov, E.S. Abdrakhimova // Glass and Ceramics. – 2019. – Vol. 76, №1–2. – P. 56–62.

2. Abdrakhimova, E.S. The influence of the temperature-gas environment of firing on the formation of the porous structure of acid-resistant materials / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov // New refractories. – 2016. – No.1. – P. 56–61.

3. Fandeev, V.P. Methods of studying porous structures / V.P. Fandeev, K.S. Samokhina. – DOI: 10.15862/34TVN415// Online journal «Science Studies». – 2015. – Vol.7, No.4. – P. 2–12. – URL: <http://dx.doi.org/10.15862/34TVN415>

4. Abdrakhimova, E.S. Kinetics of porosity structure in the firing process of Samara low-melting clays of various chemical and mineralogical composition / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2009. – Vol. 11, No.5. – P. 32–40.

5. Smolin, A.Yu. Dependences of mechanical properties of ceramics with bimodal pore size distribution on porosity at different scale levels / A.Yu. Smolin, G.V. Eremina, S.Yu. Korostelev // Izvestiya vysshchih uchebnykh zavedeniy. Physics. – 2019. – Vol. 62, No. 8. – P. 128–136. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000674590>

6. Kudryavtsev, P.G. The structure of pores in solid porous bodies. Part I / P.G. Kudryavtsev. – DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-80-103](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-80-103)// Nanotechnology in Construction. – 2018. – Vol.10, No. 5. – P. 80–103.

7. Kurmangalieva, A.I. Formation of porous structures in the technology of production of building materials based on building gypsum / A.I. Kurmangalieva, L.A. Anikanova, A.I. Kudyakov, A.B. Steshenko, A.F. Buryanov, N.A. Lukyanova, A.S. Inozemtsev, S.S. Inozemtsev // Nanotechnology in construction. – 2023. – Vol. 15, No. 4. – P. 319–327. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-319-327>.

8. Egorov A.A. Evaluation of the parameters of fractal porous media / A.A. Egorov, T.V. Gavrilenko, D.A. Bykovskikh. – DOI: 10.26117/2079-6641-2020-30-1-87-96 // Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki. – 2020. – №30: 1. – P. 87–96.

9. Mironova, E.V. Influence of modified raw quartz ceramics on sintering / E.V. Mironova, D.V. Kharitonov, A.A. Anashkina. – DOI: 10.23670/IRJ.2022.115.1.008 // International Scientific Research Journal. – 2022. – No.1 (115). – P. 48–51.

10. Abdrakhimov, V.Z. The influence of high-alumina petrochemical waste on the porosity structure of acid-resistant materials / V.Z. Abdrakhimov, V.K. Semenychev // Novye ognepory. – 2010. – No.9. – P. 148–151.

11. Kislitsyn, A.A. Investigation of pore size distribution in a porous medium using nuclear magnetic resonance / A.A. Kislitsyn, A.G. Potapov // Bulletin of the Tyumen State University. Series: Physical and mathematical modeling. Oil, gas, and energy. – 2015. – Vol. 1, No. 3. – P. 52–59.

12. Galperina, M.K. Changing the porous structure of facade tiles when testing them for frost resistance / M.K. Galperina, V.M. Egerev // Tr. in-ta / NIISTroikeramiki. – 1985. – Issue 56. – P.71–82.

13. Salakhov, A.M. Pores and strength characteristics of building materials / A.M. Salakhov, L.R. Tagirov, R.A. Salakhova // Building materials. – 2011. – No.12. – P. 25–28.

14. Fedyaev, V.L. Influence of porosity of technical materials on their strength properties / V.L. Fedyaev, E.R. Galimov, A.V. Belyaev, L.V. Sirotkina. – DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-28-35 // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2023. – No. 2 (156). – P. 28–35. – EDN: GTJXGR

15. Kudryavtsev, P.G. The main ways of creating porous composite materials / P.G. Kudryavtsev. – DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-5-256-269 // Nanotechnology in construction. – 2020. – Vol. 12, No. 5. – P. 256–269.

16. Togzhanov, I.A. Investigation of brick porosity / I.A. Togzhanov, V.Z. Abdrakhimov // Izvestiya vuzov. Construction. – 2001. – No.6. – P. 44–47.

17. Khasanov, D.I. Investigation of the large-scale effect and the concept of an elementary representative volume of rocks in relation to porosity / D.I. Khasanov, M.A. Lonshakov. – DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.55-69> // Georesources. – 2020. – No.4. – P. 55–69.

18. Abdrakhimov, V.Z. Influence of the temperature-gas environment of firing on the formation of the porous structure of ceramics / V.Z. Abdrakhimov, D.Yu. Denisov, I.V. Kovkov, E.S. Abdrakhimova // *Izvestiya vuzov. Construction.* – 2006. – No. 10. – P. 79–84.
19. Alymov, M.I. Calculation of internal pressure in a cylindrical pore / M.I. Alymov, S.I. Averin, A.B. Ankudinov // *Perspective materials.* – 2022. – No. 12. – P. 76–81. – URL: <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2022-12-76-81>
20. Abdrakhimov, V.Z. Recycling of shale clay and slag from ferrotitane smelting in the production of clinker bricks / V.Z. Abdrakhimov. – DOI: 10.52409/20731523_2023_2_40// *Izvestia Kazan State University of Architecture and Civil Engineering.* – 2023. – No.2. – P. 40–43.
21. Kotlyar, V.D. Features of properties, application and requirements for clinker bricks / V.D. Kotlyar, Yu.V. Terekhina, A.V. Kotlyar // *Building materials.* – 2015. – No.4. – P. 72–74.
22. Sobina, E.P. Development of standard porosity samples based on aluminum oxide for the mercury porometry method / E.P. Sobina // *Standards. Standard samples.* – 2019. – №15(4). – P.13–24. – URL: <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2019-15-4-13-24>
23. Sobina, E.P. Improvement of the reference complex for metrological support of porometry of solids and materials / E.P. Sobina // *Standard samples.* – 2018. – Vol. 14, No. 1–2. – P. 9–23. – DOI 10.20915/2077-1177-2018-14-1-2-9-23.
24. Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porometry and gas adsorption. Part 2: Nanopore analysis by gas adsorption: The international standard. ISO 15901-2-2022 Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption – Part 2: Analysis of nanopores by gas adsorption. Date of adoption January 01, 2022.
25. Abdrakhimov, V.Z. Influence of phosphoric slag on technical parameters and phase composition of ceramic bricks / V.Z. Abdrakhimov. – DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.2 // *Izvestiya KGSU.* – 2024. – No.3(69). – P. 15–26.
26. Abdrakhimov, V.Z. Recycling of metallurgical waste in the production of acid-resistant materials without the use of traditional natural raw materials / V.Z. Abdrakhimov. – DOI: 10.54734/20722958_2024_4_54 // *Regional architecture and engineering.* – 2024. – No.4. – P. 54–62.
27. Suleimenov, Zh.T. High-strength wall ceramics based on phosphoric slag and bentonite clay / Zh.T. Suleimenov, A.A. Sagyndykov, Zh.N. Moldamuratov, G.M. Bayalieva, Zh.B. Alimbayeva // *Nanotechnology in construction.* – 2022. – Vol. 14, No. 1. – P. 11–17. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-11-17>
28. Gryzlov, V.S. Electrothermophosphoric slags based on binder composites / V.S. Gryzlov, A.I. Fomenko, N.M. Fedorchuk, N.S. Busygin, H.H. Turgumbaeva, T.I. Beisekova, I.Z. Lapshina // *Building materials.* – 2014. – No. 10. – P. 66–68.
29. Galperina, M.K. On the question of the porosity structure of ceramic products / M.K. Galperina // *Tr. in-ta / NIIsroikeramiki.* – 1981. – P. 58–61.
30. Galperina, M.K. Kinetics of porosity structure changes during the firing of clays of various mineralogical composition / M.K. Galperina, L.V. Erokhina // *Tr. in-ta / NIIsroikeramiki.* – 1981. – Issue 45 – P. 3–18.
31. Abdrakhimov, V.Z. Determination of the porosity structure of acid-resistant materials based on non-ferrous metallurgy waste by methods of mercury porometry and diffuse PMU / V.Z. Abdrakhimov // *New refractories.* – 2024. – No.11. – P. 50–56.

УДК 666.941

DOI 10.54734/20722958_2025_3_54

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

Тараканов Олег Вячеславович,
доктор технических наук, профессор,
декан факультета «Управление
территориями»
E-mail: tarov60@mail.ru

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: +7 (8452) 99-86-03;
факс: +7 (8452) 99-86-04

Ивашенко Юрий Григорьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные материалы,
конструкции и технологии»
E-mail: kafedra.smkt@gmail.com

Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет)

Россия, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, д. 26,
тел.: +7 (495) 781-80-07,
факс: +7 (499) 183-44-38;

Ерофеева Ирина Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Основы архитектуры
и художественных коммуникаций»
E-mail: ira.erofeeva.90@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

Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,
Doctor of Sciences, Professor, Decan of the
faculty «Management of Territories»
E-mail: tarov60@mail.ru

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin

Russia, 410054, Saratov, 77,
Politechnicheskaya St.,
tel.: +7 (8452) 99-86-03;
fax: +7(8452) 99-86-04

Ivashchenko Yuri Grigorievich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Building Materials, Structures
and Technologies»
E-mail: kafedra.smkt@gmail.com

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

Russia, 129337, Moscow,
26, Yaroslavskoe shosse,
tel.: +7 (495) 781-80-07,
fax: +7 (499) 183-44-38;

Erofeeva Irina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Fundamentals of
Architecture and Artistic Communications»
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

РАСШИРЕНИЕ БАЗЫ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК ДЛЯ БЕТОНОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

О.В. Тараканов, Ю.Г. Ивашенко, И.В. Ерофеева

Рассмотрена возможность расширения базы минеральных микронаполнителей для бетонов. Проанализированы механизмы действия суперпластификаторов. Выполнены рентгенофазовые исследования гидратных фаз C_3S и цемента с модифицирующими добавками. Разработаны составы высокопрочных бетонов.

Ключевые слова: минеральные микронаполнители, суперпластификаторы, гидратация, дисперсность, гидратные фазы, рентгенофазовые исследования, высокопрочный бетон

EXPANSION OF THE BASE OF MINERAL ADDITIVES FOR NEW GENERATION CONCRETE

O.V. Tarakanov, Yu.G. Ivaschenko, I.V. Erofeeva

The possibility of expanding the base of mineral micro-fillers for concrete is considered. The mechanisms of action of superplasticizers are analyzed. X-ray phase studies of the hydrate phases of C_3S and cement with modifying additives have been performed. Compositions of high-strength concretes have been developed.

Keywords: mineral micro-fillers, superplasticizers, hydration, dispersion, hydrate phases, X-ray phase studies, high-strength concrete

В технологии современных бетонов в настоящее время широко используются химические модификаторы, многие из которых являются комплексными и полифункциональными. Широкое распространение получили супер- и гиперпластификаторы, противоморозные, добавки, повышающие прочность, воздухововлекающие и ускорители твердения. Отдельным классом добавок являются минеральные микронаполнители, основной целью которых является связывание гидролизной извести, выделяющейся при гидратации цемента, в гидросиликатные структуры, а также улучшение реотехнологических свойств бетонных смесей.

Другой важнейшей целью применения тонкомолотых микронаполнителей является повышение плотности упаковки цементных систем, что способствует заполнению межзерновых пустот, сближению частиц и увеличению межчастичных контактов.

Современные супер- и гиперпластификаторы являются неотъемлемой частью бетонов нового поколения и позволяют в смеси с минеральными микронаполнителями получать высокопрочные бетоны классов В 100 и выше [1, 2, 8, 9]. Вместе с тем анализ литературных и экспериментальных данных, касающихся механизмов действия комплексных добавок на процессы гидратации и твердения цементных материалов, свидетельствует о многообразии объяснений того или иного механизма действия как индивидуальных добавок, так и комплексных модификаторов. Кроме того, для прогнозирования характера влияния той или иной смеси необходимо, как минимум, иметь представление о составе добавки. Однако рынок современной строительной химии показал, что многие производители не указывают реальных составов добавок, что зачастую приводит к антагонистическим эффектам в цементных системах и в целом снижению ожидаемой эффективности и действия добавок. К примеру, добавки класса Melflux, достаточно широко используемые в технологии бетона, существенно различаются по длине основных и боковых цепей, что, в свою очередь, приводит к различной степени замедления начальной гидратации цементных систем вследствие неравномерного блокирования активных зон цементных зерен при адсорбции. Попытки «подгонки» структуры СП к тому или иному цементу не имеют стабильных положительных результатов вследствие изменчивости минералогического состава вяжущего, пусть даже и незначительной, например, по содержанию гипса или алюминатных фаз, ответственных за раннее структурообразование. Отметим, что минеральные микронаполнители, получаемые помолотом горных пород, в большинстве случаев также различаются химико-минералогическим составом, что, в свою очередь, приводит к изменению их реологической активности в цементных смесях.

Одним из важнейших этапов при гидратации цемента в присутствии СП является адсорбция молекул пластификатора на дисперсных частицах с дефектной поверхностью. Поэтому эффективность одного и того же СП для цементов и микронаполнителей, имеющих различную дисперсность (например при домоле), будет также различной. Образование дополнительных дефектов на поверхности частиц при домоле за счет разрыва ионных или ковалентных связей усиливает адсорбцию и хемосорбцию. Появление новых активных центров способствует не только усилению адсорбции, но и активации гидратационных процессов особенно C_3A и C_4AF . Конкурирующие процессы, имеющие различные скорости, приводят в целом к результирующему эффекту, который, к сожалению, трудно прогнозировать. Известно, что поверхность частиц любого природного минерала гидроксiliрована, поэтому при совместном домоле цемента, например, с микронаполнителями на поверхности частиц вяжущего начинается поверхностная гидратация, которая может оказать влияние на гидратацию при водозатворении. Введение добавки СП в этом случае еще более осложняет гидратационные процессы.

Эффективность пластифицирующих добавок в настоящее время исследуется в основном применительно к цементам. Однако известно [3], что многие минеральные порошки, в том числе полученные помолотом горных пород, значительно лучше разжижаются в присутствии СП и ГП. Минеральные порошки не взаимодействуют с водой в отличие от цемента, для которого уже с 0,1 с после водозатворения начинается гидратация в основном алюминатных фаз, включающих в свой состав на ранних

стадиях (AFm-фазы) от 6-8 до 20 и более молекул воды. Если учесть, что одновременно с водой вводится СП, то адсорбция его молекул может происходить не только на частицах вяжущего, но и, очевидно, в большей степени на частицах гидратных фаз.

Известно [4], что большинство современных СП замедляют процессы начальной гидратации силикатных фаз цемента и стабилизируют AFm-фазы, сдерживая переход их в наиболее термодинамически устойчивые кубические структуры гидроалюминатов кальция.

Следует отметить, что эффективность современных СП и ГП бесспорна, поскольку вследствие значительного снижения водосодержания бетонных смесей при совместном использовании гидратационно активных добавок они позволяют получать высокопрочные бетоны. Однако сложные физические и электрохимические процессы, протекающие на границах раздела фаз, на поверхности дисперсных частиц и в жидкой фазе, влияют на последующие процессы кристаллизации и перекристаллизации гидратных фаз цементного камня. Известно, что пластифицирующие добавки в большинстве случаев приводят к искажению кристаллических структур гидратных фаз, затрудняют процесс нормальной гидратации и в конечном счете приводят к нарушению процесса формирования структуры гидросиликатов кальция (ГСК), AFm- и AFt-фаз. Ускорители твердения, напротив, способствуют образованию двойных и основных солей с минералами цементного клинкера, упрочняющих структуру и способствующих повышению прочности. Анализ совместного влияния пластифицирующих добавок, используемых совместно с ускорителями и другими компонентами, на процессы гидратации и структурообразования цементных систем и тем более в присутствии микронаполнителей представляет значительный научный интерес, поскольку позволяет определить характер синергетических и антагонистических эффектов, возникающих в процессе приготовления бетонных смесей и при последующем твердении.

К сожалению, проектирование большинства комплексных органоминеральных добавок происходит эмпирически без учета характера их индивидуального влияния и тем более совместного действия на гидратацию и твердение цемента.

В последнее время все большее внимание ученых привлекают бинарные минеральные микронаполнители, а также еще более сложные комплексы. Преимущество бинарных систем заключается в том, что они в определенной степени позволяют нивелировать некоторые негативные явления при использовании индивидуальных микронаполнителей.

К примеру, микрокремнеземы снижают эффективность СП и ГП, а использование их совместно с гранитной каменной мукой позволяет получать высокопластичные бетонные смеси и высокопрочные бетоны. Большой интерес представляют минеральные добавки, полученные помолотом плотных карбонатных пород, которые кроме высокой реологической активности обладают способностью эпитаксиального наращивания на гранях кристаллов кальцита гидратов цементного камня.

Важную роль в процессе гидратации модифицированных цементных систем играют структура и ионный состав модификаторов [4].

Выполненные рентгенофазовые исследования состава гидратных фаз C_3S , гидратированного в течение 90 суток, без добавок и с добавками $CaCl_2$ и $NaCl$ показали, что катион добавки оказывает существенное влияние на состав продуктов гидратации. В присутствии хлорида кальция резко возрастает интенсивность отражений извести ($2,63$; $1,92$; $1,79$ Å) и снижается интенсивность отражений безводного C_3S ($2,776$; $2,73$ Å). Это свидетельствует об активации процесса гидратации C_3S . В присутствии добавки $NaCl$ ускоряющее влияние проявляется в меньшей степени (табл. 1-3). Таким образом, в достаточно чистых системах отчетливо проявляется различный характер влияния катионов кальция и натрия. В более сложных цементных системах различный характер влияния катионов также ощутим, но различить это влияние по характеру рентгенограмм достаточно сложно. По характеру влияния добавок на прочность C_3S также отмечается большее повышение в присутствии $CaCl_2$.

Состав гидратных фаз C_3S нормального твердения (90 суток)

20	D	$I, \%$	I, mm
18,13	4,8929	100	55
28,75	3,1051	9	5
29,28	3,0501	24	13
29,42	3,0359	27	15
29,57	3,0209	25	14
30,00	2,9785	9	5
31,80	2,8139	5	3
32,15	2,7841	64	35
32,40	2,7632	27	15
32,64	2,7434	29	16
32,80	2,7304	29	16
34,15	2,6255	78	43
34,37	2,6092	76	42
38,80	2,3209	4	2
39,00	2,3094	2	1
39,70	2,2703	2	1
41,30	2,1860	27	15
41,90	2,1560	2	1
43,08	2,0997	2	1
45,70	1,9852	11	6
46,85	1,9391	5	3
47,23	1,9244	22	12
50,90	1,7939	18	10
51,50	1,7744	15	8
51,78	1,7655	15	8
51,90	1,7617	15	8
54,40	1,6865	5	3
56,45	1,6300	15	8
59,90	1,5441	4	2
62,05	1,4957	5	3
62,50	1,4860	5	3
64,35	1,4477	2	1

Т а б л и ц а 2

Состав гидратных фаз C_3S с добавкой 2 % $CaCl_2$ (90 суток)

20	D	$I, \%$	I, mm
1	2	3	4
8,28	10,6782	11	8
12,58	7,0363	8	6
18,20	4,8742	100	75
28,87	3,0925	8	6
29,60	3,0179	24	18
32,28	2,7732	33	25
32,60	2,7467	8	6
32,90	2,7223	8	6
33,65	2,6633	3	2
34,30	2,6143	93	70
36,80	2,4423	4	3
41,35	2,1834	11	8

1	2	3	4
43,35	2,0872	3	2
44,45	2,0381	3	2
45,90	1,9770	5	4
47,40	1,9179	27	20
50,98	1,7913	27	20
51,80	1,7649	7	5
52,15	1,7538	8	6
54,60	1,6808	11	8
56,30	1,6340	5	4
56,75	1,6221	4	3
59,90	1,5441	4	3
62,10	1,4946	5	4
62,75	1,4807	13	10
64,40	1,4467	13	10

Т а б л и ц а 3

Состав гидратных фаз C_3S с добавкой 2 % NaCl (90 суток)

2θ	D	I, %	I, mm
18,13	4,8929	100	45
28,75	3,1051	18	8
29,28	3,0501	22	10
29,42	3,0359	33	15
29,57	3,0209	31	14
30,00	2,9785	7	3
31,15	2,8711	7	3
32,15	2,7841	89	40
32,40	2,7632	18	8
32,64	2,7434	22	10
32,80	2,7304	20	9
34,15	2,6255	96	43
34,37	2,6092	71	32
35,14	2,5537	7	3
36,00	2,4947	2	1
36,60	2,4552	2	1
39,00	2,3094	2	1
39,70	2,2703	4	2
41,30	2,1860	27	12
41,90	2,1560	2	1
43,08	2,0997	4	2
45,70	1,9852	4	2
46,90	1,9372	7	3
47,23	1,9244	27	12
50,90	1,7939	22	10
51,50	1,7744	18	8
51,78	1,7655	9	4
51,90	1,7617	13	6
54,40	1,6865	20	9
56,45	1,6300	4	2
59,90	1,5441	11	5
62,05	1,4957	4	2
62,45	1,4871	9	4
64,35	1,4477	9	4

С целью изучения влияния комплексной органоминеральной добавки на состав продуктов гидратации цемента была выполнена серия рентгенофазовых исследований цементного камня без добавки, с добавкой только ГП и с добавкой ГП+микрокремнезем.

Результаты изменения интенсивностей извести и безводных силикатных фаз цемента, представленные в табл. 4 и 5, показали, что в составе цемента с добавкой ГП происходит снижение интенсивности отражений извести по сравнению с контрольным составом. В то время как высокие значения интенсивностей отражений безводных силикатных фаз цемента в составе с добавкой ГП также свидетельствуют о замедлении гидратации. В присутствии добавок микрокремнезема и ГП происходит ещё большее снижение интенсивности отражений извести по сравнению с контрольным составом и составом с добавкой ГП. Очевидно, это свидетельствует о том, что часть гидратной извести связывается в гидросиликатные структуры, об этом свидетельствует также снижение интенсивностей безводных силикатных фаз в образце с добавкой микрокремнезема и ГП по сравнению с образцом с добавкой ГП, хотя эти значения выше, чем для контрольного состава, и это также свидетельствует о замедлении гидратации цементных систем с добавкой ГП даже в присутствии микрокремнезема (табл. 3).

Т а б л и ц а 4

Интенсивность отражений Ca(OH)_2

Состав	Интенсивность $I_{\max}$ при d (Å)						
	4,93	3,11	2,63	1,93	1,79	1,69	1,485
№1 контрольный	350	75	175	90	63	40	40
Цемент+гиперпластификатор (1 % от массы цемента)	130	56	117	60	50	38	42
Цемент+микрокремнезем (7 % от массы цемента, гиперпластификатор 1 % от массы цемента)	67	40	68	40	39	38	40

Т а б л и ц а 5

Интенсивность отражений безводных силикатных фаз цемента

Состав	Интенсивность при d (Å)	
	2,7761	2,744
Цемент без добавок (контрольный состав)	85	50
Цемент+гиперпластификатор (1 % от массы цемента)	108	100
Цемент+микрокремнезем (7 % от массы цемента, гиперпластификатор 1 % от массы цемента)	90	72

Применение микронаполнителей в бетонах широко известно. Однако, если раньше использовались с целью замены части цемента (в количестве 15–30 % без потери прочности), то в бетонах нового поколения микронаполнители (в частности каменная мука) применяются с целью создания (увеличения особенно в малцементных бетонах) реологически активной тонкодисперсной матрицы [5–10].

Известно, что многие минеральные порошки, особенно полученные помолотом плотных и прочных горных пород, в большей степени, чем цементы, подвержены разжижающему действию СП и ГП [10]. Это объясняется тем, что с самого начала водозатворения в цементных системах образуются гидратные фазы, связывающие большое количество воды (особенно AFm - и AFt -фазы). Частицы микронаполнителя не образуют гидратных фаз и поэтому лучше разжижаются в присутствии СП и ГП. Однако характер пластифицирующего действия во многом определяется зарядовым состоянием частиц. Таким образом, при использовании минеральных порошков в количестве до 100 % от массы цемента создаются условия для увеличения дисперсной

матрицы и повышения эффективности использования СП и ГП в цементно-минеральных системах по сравнению с чисто цементными. В свою очередь, это позволяет добиться большего снижения водосодержания и соответственно большего повышения прочности бетона. Этот факт чрезвычайно важен в технологии зимнего бетонирования.

Положительным фактором является также заполнение пустот и сближение частиц вяжущего и наполнителя до малых расстояний, при которых возможно образование кристаллизационных мостов и наращивание гидратов как на поверхности цементных частиц, так и на поверхности частиц микронаполнителя.

Например, с большей вероятностью микрокристаллы гидроалюминатов кальция будут образовываться на поверхности минеральных частиц микронаполнителей, которые имеют структуру элементарной кристаллической ячейки, близкую к структуре, например, AFm-фаз. К подобным микронаполнителям относятся порошки, полученные помолотом карбонатных пород. С целью снижения энергозатрат при помоле прочных и плотных горных пород (например гранита) в качестве минеральных наполнителей возможно применение бинарных систем, например смеси порошков гранита и менее прочной породы – кальцита и др.

Кроме того, использование бинарных систем позволяет повысить не только реологическую активность добавок, но и их гидратационную активность, т.е. возможность формирования различных гидросиликатных структур с гидратной известью цемента.

С целью изучения характера влияния комплексных полиминеральных добавок на кинетику твердения бетонов была выполнена серия экспериментов на бездобавочном ЦЕМ I 42,5Н.

Т а б л и ц а 6

Влияние полиминеральных добавок на прочность песчаных бетонов

Состав бетона	Количество компонентов, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа (сут)			
		1	7	28	90
1	2	3	4	5	6
ЦЕМ I 42,5Н Песок тонкий РГОК Известняк 50 % от Ц Биокремнезем 5 % от Ц С добавкой ГП – 0,8 % В/Т 0,115	678 1016 339 34	23,2	66	96	140
ЦЕМ I 42,5Н Песок тонкий полевошпатный (г. Красноярск) Известняк 25 % от Ц Доломит 75 % от Ц Микрокремнезем С добавкой ГП – 0,8 % В/Т 0,126	656 984 164 492 66	38,8	81,2	94	126
ЦЕМ I 42,5Н Песок тонкий полевошпатный Известняк 25 % от Ц Доломит 75 % от Ц Белая сажа БС 155 С добавкой ГП – 0,8 % В/Т 0,143	653 980 163 489 33	28,8	72	83,6	110

1	2	3	4	5	6
ЦЕМ I 42,5Н	685				
Песок тонкий сурский	1028				
Известняк 25 % от Ц	171				
Доломит 75 % от Ц	513	50	78	106,8	131
Микрокремнезем	69				
С добавкой ГП – 0,8 %					
В/Т 0,110					
ЦЕМ I 42,5Н	669				
Песок тонкий сурский	1004				
Известняк 25 % от Ц	167				
Доломит 75 % от Ц	501	21	60	96	125
Микрокремнезем	67				
С добавкой ГП – 0,8 %					
В/Т 0,110					

Результаты, представленные в табл. 6, показали, что с использованием 2–4 микронаполнителей совместно с ГП возможно стабильное достижение высокой прочности (85–100 МПа) песчаных бетонов. В возрасте 90 суток прочность возрастает до 110–140 МПа.

Более сложной задачей является оценка кристаллохимического состояния частиц, на поверхности которых возможна локализация нескольких кристаллических структур. В зависимости от строения этих включений и близости их параметров к параметрам структур гидросиликатов и гидроалюминатов кальция можно прогнозировать формирование на этих участках гидратных фаз цементного камня. К подобным минералам относятся, например, карбонатные породы, широко распространенные в земной коре. На гранях кальцита, имеющего параметры кристаллической решетки, близкие к параметрам $\text{Ca}(\text{OH})_2$, и гидроалюминатов кальция AFm-фаз возможно эпитаксиальное наращивание гидратных фаз цемента с образованием кристаллизационных мостов между частицами кальцита и цемента. Наиболее эффективными с точки зрения использования в технологии высокопрочных бетонов (ВГПБ) будут микронаполнители, сочетающие в себе реологическую и гидратационную активность в цементных системах.

В отношении гидросиликатных структур следует отметить, что в присутствии кальцита и ионов CO_3^{2-} возможно изменение порядка конденсации ортосиликатов кальция, вследствие чего в системе формируется множество гидратных фаз различной структуры, переплетающихся и срастающихся между собой, результатом чего является образование мелкокристаллической мозаичной структуры, способствующей в целом повышению прочности цементных систем.

К сказанному следует добавить, что в процессе гидратации в системе образуются одновременно гидроалюминатные структуры (в первую очередь) и гидросиликаты кальция, в результате чего формируется сложная гидратная масса, состоящая из множества кристаллических структур, переплетающихся между собой. Огромное значение имеют дефекты кристаллических структур. Дефекты являются причиной нестехиометрии SiO_2 , а примесные ионы оказывают сильное влияние на реакционную способность. В структуре SiO_2 кремний и кислород различаются по электроотрицательности. В сложной системе $\text{SiO}_2\text{--CaO--CaCO}_3\text{--H}_2\text{O}$ невозможно добиться воспроизводимости реакций гидратообразования, и это связано не только с особенностями конденсационных процессов, но и с огромной ролью дефектов формирующихся кристаллических структур. Карбонатный микронаполнитель способствует стабильному повышению прочности цементных материалов. Однако, по данным рентгенофазового анализа, достаточно сложно идентифицировать (точнее, различить) гидросульфалюминаты и гидрокарбоалюминаты кальция вследствие близких параметров межплоскостных расстояний этих гидратов. В отношении гидросиликатов кальция следует отметить, что, так как кремнекислородные мотивы имеют неустойчивую структуру,

атомы кремния могут мигрировать в соседние тетраэдрические пустоты. В результате чего кремнекислородные радикалы приспосабливаются к основному мотиву кристаллической структуры и предрасположены к захвату примесных ионов из раствора при гидратации с образованием слоистых и ленточных гидросиликатов кальция сложного состава.

Перспективным направлением в технологии бетонов нового поколения является использование тонкомолотых карбонатных пород в смеси с более плотными породами (гранит, базальт и др.) в качестве минеральных компонентов с целью повышения эффективности СП и ГП и снижения водопотребности бетонных и растворных смесей. Применение бинарных и более сложных минеральных микронаполнителей является целесообразным, поскольку в этом случае создается возможность нивелирования некоторых негативных явлений, возникающих при использовании индивидуальных наполнителей, и влияния изменчивости состава цементов. Например, некоторые микронаполнители, удовлетворительно работающие индивидуально, являются более эффективными при совместном использовании.

В данной работе представлены результаты выполненных исследований кинетики твердения и прочности реакционно-порошкового бетона нового поколения с комплексной органоминеральной добавкой, состоящей из смеси СП, мытого кварцевого песка, микрокальцита и микрокремнезема.

Т а б л и ц а 7

Кинетика твердения и прочность реакционно-порошкового бетона
с органоминеральной добавкой

	Расход материалов на 1 м ³	В/Ц	Плотность бетона ρ, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа		
				1 сут	7 сут	28 сут
ЦЕМ I/A 42,5 Н	697	0,33	2290	77	109	132
Микрокальцит $S_{\text{уд}} = 2600 \text{ см}^2/\text{г}$	325					
Песок мытый $0,0 \div 0,63$	1018					
Микрокремнезем 11 % от ПЦ	76					
Пластификатор Melflux2641F 0,9 % от ПЦ	6,3					
Вода	233					

Установлено, что применение бинарных минеральных композиций совместно с высокоэффективным суперпластификатором позволяет получать бетоны нового поколения прочностью 130 МПа.

Бетон нового поколения является наукоемким, и получение его связано с использованием положений фундаментальных наук химии, физико-химии, поверхностных явлений, а также положений физико-химической механики агрегативно-устойчивых дисперсных систем (суспензии). Производство бетона в мире достигло в настоящее время 18-20 млрд т в год. Бетон – основной конструкционный материал в строительстве. С развитием высокопрочного и сверхпрочного бетона связана глобальная экономика любой мировой державы, выпускающей большие объемы бетона. И эта глобальная экономика определяется не столь высокой экономикой в строительстве по сравнению с экономикой в отраслях, сопутствующих производству бетонов.

Огромное количество минеральных отходов и побочных продуктов различных отраслей промышленности (более 7 млрд тонн) позволяет значительно расширять базу минеральных добавок для современных бетонов. Важными являются результаты исследований, показавшие целесообразность использования совместно с тонкомолотыми каменными материалами фракционированных, молотых и мелких кварцевых

песков. Бинарные и многокомпонентные микронаполнители для бетонов, используемые совместно с суперпластификаторами, позволяют создавать современную высокотехнологичную индустрию бетонов нового поколения.

Список литературы

1. Калашников, В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Строительные материалы и изделия. Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 4. – С. 30–36: ил. – Библиогр.: с. 35 (11 назв.). – Рез. на англ. яз.: с. 36. – ISSN 0536–1052.
2. Erofeev, V. Chemical, physical, fresh and mechanical properties of modified biocidal cements / V. Erofeev, S. Gladkin, A. Rodin, S. Karpushin, I. Erofeeva, Ya. Sanyagina, S. Klyuev, A. Klyuev, Yu. Liseitsev, R. Fediuk. – DOI:10.1016/j.istruc.2024.106649 // Structures. – 2024. – Vol. 64. – P. 106649.
3. Калашников, В.И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Калашников. – Воронеж, 1996.
4. Тараканов, О.В. Цементные материалы с добавками на основе вторичного сырья / О.В. Тараканов. – Пенза : ПГУАС, 2004. – 564 с.
5. Wu, L. Effects of pozzolans on acid resistance of shotcrete for sewer tunnel rehabilitation (Article) / L. Wu, C. Hu, W.V. Liu. – DOI: 10.1080/21650373.2018.1519645 // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. – 2 January 2019. – Vol. 8, Issue 1. – P. 55–77.
6. Ramezaniapour, A.A. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against sulfuric acid attack (Conference Paper) / A.A. Ramezaniapour, A. Zolfagharnasab, F.B. Zadeh, S.H. Estahbanati, R. Boushehri, M.R. Pourebrahimi, A.M. Ramezaniapour. – DOI:10.1007/978-3-319-59471-2_261 // High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet – Proceedings of the 2017 fib Symposium. – 2017. – P. 2290–2298.
7. Idahdooh, M.A.A. Evaluation of ultrahigh-performance – fiber reinforced concrete binder content using the response surface method / M.A.A. Idahdooh, N. Muhamad Bunnori, M.A. Megat Johari. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.06.034// Mater Des. – 2013.
8. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов : в 3 ч. Часть. 1 : Виды реологических матриц в бетонной смеси, стратегия повышения прочности бетона и экономия его в конструкциях / В.И. Калашников // Технологии бетонов. – 2007. – № 5. – С 8–10.
Часть 2 : Тонкодисперсные реологические матрицы и порошковые бетоны нового поколения. – 2007. – № 6. – С. 8–11.
Часть 3 : От высокопрочных и особовысокопрочных бетонов будущего к суперпластифицированным бетонам общего назначения настоящего. – 2008. – № 1. – С. 22–26.
9. Калашников, В.И. Высокоэффективные порошково-активированные бетоны различного функционального назначения с использованием суперпластификаторов / В.И. Калашников, Е.В. Гуляева, Д.М. Валиев, В.М. Володин, А.В. Хвастунов // Строительные материалы. – 2011. – № 11. – С. 44–47.
10. Калашников, В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2012. – № 10. – С. 70–71.

References

1. Kalashnikov, V.I. Suspension-filled concrete mixes for new generation powder-activated concretes / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, O.V. Tarakanov // Construction materials and products). News of universities. Construction. – 2016. – No. 4. – P. 30–36: ill. – Bibliography: p. 35 (11 titles). – Res. in English: p. 36. – ISSN 0536–1052.

2. Erofeev, V. Chemical, physical, fresh and mechanical properties of modified biocidal cements / V. Erofeev, S. Gladkin, A. Rodin, S. Karpushin, I. Erofeeva, Ya. Sanyagina, S. Klyuev, A. Klyuev, Yu. Liseitsev, R. Fediuk. – DOI:10.1016/j.istruc.2024.106649 // Structures. – 2024. – Vol. 64. – P. 106649.
3. Kalashnikov, V.I. Fundamentals of plasticization of mineral dispersed systems for the production of building materials : Abstract of the dissertation of Doctor of Sciences / V.I. Kalashnikov. – Voronezh, 1996.
4. Tarakanov, O.V. Cement materials with additives based on secondary raw materials / O.V. Tarakanov. – Penza : PSUAS, 2004. – 564 p.
5. Wu, L. Effects of pozzolans on acid resistance of shotcrete for sewer tunnel rehabilitation (Article) / L. Wu, C. Hu, W.V. Liu. – DOI: 10.1080/21650373.2018.1519645 // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. – 2 January 2019. – Vol. 8, Issue 1. – P. 55–77.
6. Ramezaniapour, A.A. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against sulfuric acid attack (Conference Paper) / A.A. Ramezaniapour, A. Zolfagharnasab, F.B. Zadeh, S.H. Estahbanati, R. Boushehri, M.R. Pourebrahimi, A.M. Ramezaniapour. – DOI:10.1007/978-3-319-59471-2_261 // High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet – Proceedings of the 2017 fib Symposium. – 2017. – P. 2290–2298.
7. Idahdooh, M.A.A. Evaluation of ultrahigh-performance – fiber reinforced concrete binder content using the response surface method / M.A.A. Idahdooh, N. Muhamad Bunnori, M.A. Megat Johari. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.06.034 // Mater Des. – 2013.
8. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology to the future of concrete : in 3 part. Part 1 : Types of rheological matrices in concrete mix, strategy for increasing concrete strength and saving it in structures / V.I. Kalashnikov // Concrete Technology. – 2007. – No. 5. – P. 8–10.
Part 2 : Finely dispersed rheological matrices and new generation powder concretes. – 2007. – No. 6. – P. 8–11.
Part 3 : From high-strength and especially high-strength concretes of the future to general-purpose superplasticized concretes of the present. – 2008. – No. 1. – P. 22–26.
9. Kalashnikov, V.I. Highly efficient powder-activated concretes for various functional purposes using superplasticizers / V.I. Kalashnikov, E.V. Gulyaeva, D.M. Valiev, V.M. Volodin, A.V. Khvastunov // Construction materials. – 2011. – No. 11. – P. 44–47.
10. Kalashnikov, V.I. What is new generation powder-activated concrete / V.I. Kalashnikov // Construction materials. – 2012. – No. 10. – P. 70–71.

УДК 691.3

DOI 10.54734/20722958_2025_3_65

*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**Логанина Валентина Ивановна**,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Управление качеством»
E-mail: loganin@mai.ru**Пылаев Вадим Сергеевич**,
аспирант кафедры «Управление качеством»
E-mail: whenpay@gmail.com**Филинова Милана Игоревна**,
студент*Penza State University of Architecture and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Loganina Valentina Ivanovna**,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Quality Management»
E-mail: loganin@mai.ru**Pylaev Vadim Sergeevich**,
Postgraduate student of the Department
«Quality Management»
E-mail: whenpay@gmail.com**Filinova Milana Igorevna**,
Student

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ИЗВЕСТКОВЫХ ПОКРЫТИЙ С ДОБАВКАМИ ПОЛИСАХАРИДОВ

В.И. Логанина, В.С. Пылаев, М.И. Филинова

Представлены результаты исследования трещиностойкости известковых покрытий на основе составов с добавками полисахаридов Atren Cem LV и Atren Cem HV. Трещиностойкость определяли методом индентирования с визуализацией отпечатка методом Виккерса. Значение критического коэффициента интенсивности напряжений, характеризующего трещиностойкость покрытия с добавками полисахаридов, после 25 циклов замораживания-оттаивания в 2,66 раза выше, по сравнению с исходным покрытием. Показано, что коэффициент повреждаемости поверхности покрытия с добавкой полисахарида Atren Cem LV после 25 циклов замораживания-оттаивания в 2 раза ниже по сравнению с исходным покрытием.

Ключевые слова: известковое покрытие, полисахариды, морозостойкость, трещиностойкость, коэффициент интенсивности напряжений

CRACK RESISTANCE OF LIME COATINGS WITH POLYSACCHARIDES ADDITIVES

V.I. Loganina, V.S. Pylaev, M.I. Filinova

The results of a study of the crack resistance of lime coatings based on compositions with the addition of Atren Cem LV and Atren Cem HV polysaccharides are presented. The crack resistance is determined by the indentation method with indentation visualization using the Vickers method. The value of the critical stress intensity factor, which characterizes the crack resistance of the coating, after 25 freeze-thaw cycles is 2.66 times higher than that of the original coating. It has been shown that the damage coefficient of the surface of the coating with the addition of Atren Cem LV polysaccharide after 25 freeze-thaw cycles is 2 times lower, than of the original coating.

Keywords: lime coating, polysaccharides, frost resistance, crack resistance, stress intensity factor

Использование известкового раствора для соединения, защиты и украшения зданий было очень распространенным методом в древние времена. Известковые штукатурки применялись в декоративных и строительных целях с момента зарождения пиротехники в Леванте ок. 10 000–12 000 лет до н. э. [1]. Доколумбовые цивилизации, такие, как майя, независимо друг от друга разработали известковую пиротехнологию, причем первые свидетельства об ее использовании в архитектуре датируются ок. 1100 г. до н.э.

Известь также получила широкое распространение в Китае еще во времена династии Чжоу (7 век до н.э.) [2]. В 420-589 гг. н. э. появился новый вид известкового продукта – санхету, который состоял из трех основных материалов (известь, песок и глина) и небольшого количества органических добавок. Санхету, называемый китайско-римским раствором, обладал не только высокой прочностью, но и хорошей водонепроницаемостью.

Во второй половине XIX века появление портландцемента привело к значительному сокращению использования известковых растворов, поскольку цемент обладал некоторыми важными преимуществами, такими, как быстрое время схватывания и высокая механическая стойкость. Однако в последние годы возродилось использование известковых растворов при реставрации исторических зданий, поскольку было обнаружено, что цементные растворы обладают некоторыми свойствами, несовместимыми со многими природными камнями [3, 4].

В настоящее время традиционный известковый раствор привлекает внимание архитекторов и ученых благодаря его совместимости с природным камнем, штукатурками, которыми были отделаны древние здания. Как известно, известковые составы очень медленно твердеют, что затрудняет производство отделочных работ. Для ускорения твердения и повышения прочности известковых композитов в рецептуру вводят добавки (алюминат натрия, фторид натрия, карбонат калия, хлорид кальция, аморфная окись алюминия, карбонат лития, формиат кальция, тонкодисперсный аморфный кремнезем и др.).

Для повышения стойкости композитов на основе минеральных вяжущих при решении технологических задач всё большее внимание уделяется коллоидным дисперсиям на основе диоксида кремния. Дополнительный структурный элемент, представляющий собой наночастицу оксида кремния, со временем в результате реакции с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ переходит в гидросиликат кальция, способствует существенному (до 30 %) сокращению количества пор размером от 1 нм и выше (происходит заполнение пор частицами золя и продуктами его взаимодействия) [5–7].

Для того чтобы ускорить процесс твердения извести, предлагается также вводить в рецептуру известковых составов добавки на основе природных цеолитов [8]. Академиком В.П. Селяевым установлено, что при введении в цементные системы частиц цеолитсодержащей породы, которая отличается сорбционными свойствами, ионы фтора и кальция образуют труднорастворимые соединения, которые заполняют поры наполненного цементного камня. Это приводит к уменьшению концентрации фторид-ионов, утолщению диффузионного слоя, понижению температуры при гидратации за счет уменьшения доли цемента при введении наполнителя, повышению прочности цементного камня, а также выделению свободной извести.

С учетом локальности запасов природных цеолитов и неоднородности их состава и свойств представляется перспективным использование синтетических цеолитов при приготовлении составов на основе минеральных вяжущих. В [9] предложено применять в композитах на основе минеральных вяжущих синтезированные цеолиты. Авторами выявлены закономерности структурообразования известкового композита в присутствии добавки, содержащей синтетический цеолит, а именно: образование гидросиликатов кальция-натрия и минералов группы цеолитов, увеличение количества химически связанной извести на 8,74 %.

В работах [10, 11] предложено для повышения стойкости известковых покрытий использовать синтезированные гидросиликаты (ГСК). Разработан известковый состав для отделки и реставрации стен зданий в виде сухой смеси, содержащий наполнитель на основе гидросиликатов кальция и позволяющий получить растворные смеси с вододерживающей способностью 98-99 %, временем высыхания до степени «5» 15-20 мин, жизнеспособностью 1–1,5 часа.

Для повышения стойкости к отслаиванию известковых смесей рекомендуется применять органоминеральную добавку, полученную адсорбцией поверхностно-активных веществ на глине с повышенным содержанием монтмориллонита [12, 13].

Для восстановления исторических кладок в [14] предлагается использовать известково-метакаолиновые смеси. Данные растворы применялись для производства некоторых белых штукатурок Генуи (Chiaverini, 2004; Маннони, 1988).

В работе [15] обосновывается использование при реставрации известковых составов, в рецептуру которых вводятся органические компоненты (полисахариды, белки и жирные кислоты). Авторами определено, что введение животного клея в качестве добавки повышает механическую прочность раствора в 2 раза, увеличивает в 2 раза фронт карбонизации, уменьшает пористость и размер пор. Следует отметить, что в Старом Свете растительные экстракты, клейкий рис, фруктовые соки, масла, животные жиры и даже кровь или пиво часто добавляли в гашеную известь для улучшения свойств известковых растворов и штукатурок [16].

Многие вопросы обеспечения стойкости известковых композитов, особенно при реставрации объектов культурного наследия, остаются нераскрытыми. Представляет практический интерес применение синтетических полисахаридов в рецептуре известковых составов, применяемых при реставрации зданий исторической застройки, а также при отделке вновь строящихся объектов.

С этой целью были проведены исследования по определению влияния добавок синтетических полисахаридов Atren Cem LV и Atren Cem HV на свойства известковых композитов. Добавки Atren Cem LV и Atren Cem HV представляют собой водорастворимые модифицированные полисахариды (ТУ 2458-062-63121839-2014), которые изготавливают на основе модифицированного эфира гидроксиэтилцеллюлозы. Было установлено, что наличие полисахаридов в рецептуре известковых составов способствует повышению толщины карбонизированного слоя, увеличению содержания кальцита, повышению когезионной прочности известковых покрытий [17].

В ходе дальнейших исследований было оценено влияние добавок полисахаридов на стойкость известковых покрытий в процессе эксплуатации.

В работе применяли гашеную известь (пушонка) активностью 83 %. Добавки полисахаридов вводились вместе с водой затворения.

Испытания на морозостойкость проходили по следующему режиму. Окрашенные известковым составом с добавками полисахаридов образцы цементно-песчаного раствора после насыщения в воде помещались в морозильную камеру с температурой минус 15 °С и выдерживались 4 часа, после чего помещались в воду с температурой 20 °С на четыре часа (один цикл). За «отказ» принималось состояние покрытия, характеризующееся III.4 баллами по ГОСТ 6992-68 «Материалы лакокрасочные. Метод определения устойчивости покрытия в атмосферных условиях» [12].

Для оценки трещинообразования полимерных покрытий применяли методику, основанную на соотношении между длиной трещины, отпечатком индентора Виккерса и вязкостью разрушения. Критический коэффициент интенсивности напряжений определяли по формуле

$$K_{Ic} = 0,028HV a^{0,5} (E / HV)^{0,5} (C / a)^{-1,5}, \quad (1)$$

где HV – твердость по Виккерсу; C – полудлина радиальных трещин; a – полудлина диагонали отпечатка.

Определение твердости по Виккерсу производилось вдавливанием в испытуемый материал четырехгранной алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136°.

$$HV = \frac{2P \sin \alpha / 2}{d^2}, \quad (2)$$

где P – нагрузка на индентор, Н; α – угол между противоположными гранями индентора Виккерса; d – диагональ отпечатка индентора Виккерса, мм.

Повреждаемость поверхности покрытия определяли как отношение микротвердости HV к коэффициенту интенсивности напряжений K_{Ic} . Данное отношение

характеризует способность материала сопротивляться механическим повреждениям его поверхности [21].

В соответствии с линейной механикой разрушения растрескивание покрытий происходит, если $K_1 \geq K_{1c}$ (K_1 – коэффициент интенсивности напряжений; K_{1c} – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений).

Результаты испытаний приведены на рис. 1 и 2, а также в таблице.

Установлено, что покрытие на основе состава с добавками полисахаридов выдержало 35 циклов испытаний, после чего покрытие было оценено III.3 баллами (рис. 1,б). Данная оценка характеризуется состоянием покрытия, при котором наблюдаются потеря блеска до 50 % и значительное изменение цвета, появляются белесоватость и бронзировка, а также грязеудержание. В покрытии проявляется отслаивание верхнего слоя до 5 % поверхности, образуются трещины или поверхностные сетки, видимые невооруженным глазом и охватывающие до 50 % слоя (см. рис. 1, 2). Марка по морозостойкости составила F 35.



Рис. 1. Внешний вид образцов покрытий до испытаний

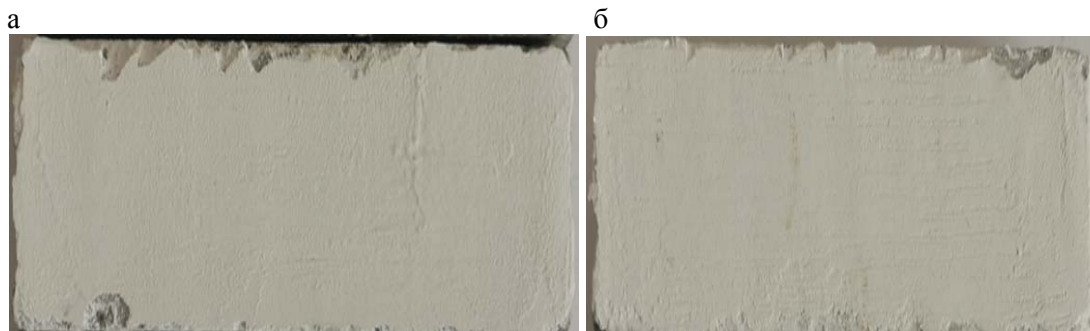


Рис. 2. Внешний вид образцов покрытий:
а – контрольные после 25 циклов испытаний;
б – с полисахаридами после 35 циклов испытаний

Образцы на основе контрольного состава выдержали 25 циклов замораживания-оттаивания (рис. 2,а).

На рис. 3 показана зависимость изменения микротвердости исследуемых покрытий от длины диагонали отпечатка. Как следует из представленных данных, микротвердость на участке при нагрузках от 0,5 до 1,5 кгс у контрольных образцов и от 1 до 2 кгс у покрытий с добавкой полисахарида практически стабилизируется (на графике соответствует длине диагонали от 0,7 до 1,3 мм – у контрольных образцов). Полученные результаты свидетельствуют также о повышении микротвердости покрытия с добавками полисахаридов. Так, среднее значение микротвердости исходного покрытия составило 19,3 МПа, а покрытия с добавками полисахаридов – 24,7 МПа.

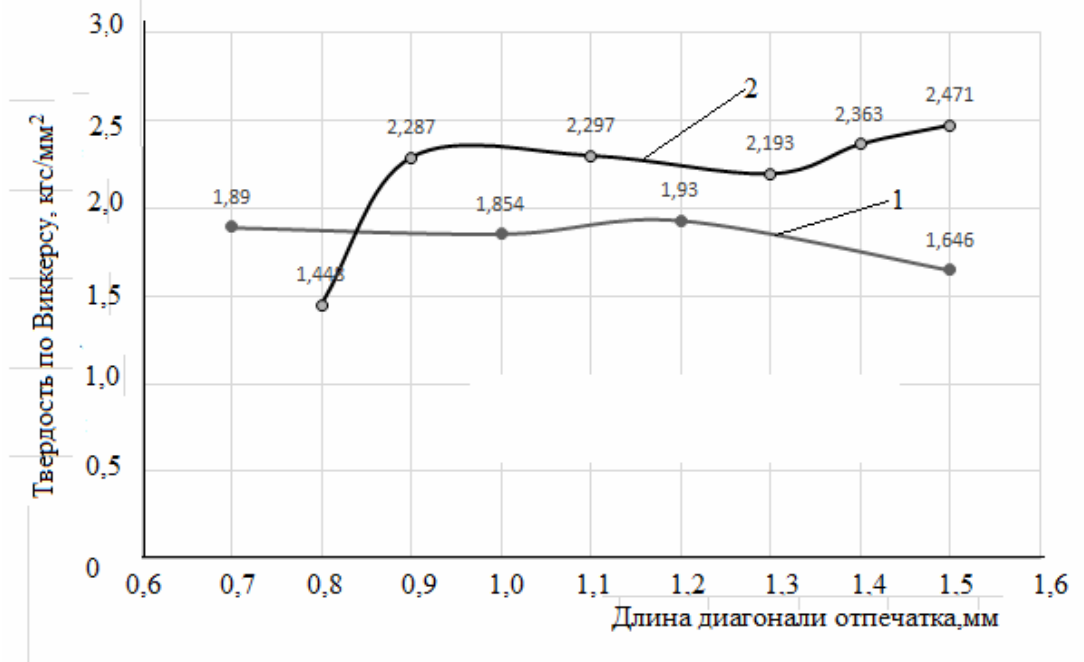


Рис. 3. Зависимость твердости покрытий от длины диагонали отпечатка:
1 – контрольный образец; 2 – образец с добавкой полисахарида Atren Cem LV

При оценке твердости покрытий и коэффициента интенсивности напряжений после 25 циклов замораживания-оттаивания установлено, что в контрольном известковом покрытии трещины появляются уже при нагрузке 2 кгс (см. таблицу).

Значения коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} и микротвердости покрытий после 25 циклов замораживания-оттаивания

Нагрузка, кгс	Коэффициент интенсивности напряжений K_c , МПа·м		Средняя длина диагонали отпечатка, мм		Средняя длина трещины, мм	
	Контрольный образец без добавок	Образец с добавкой Atren cem LV	Контрольный образец без добавок	Образец с добавкой Atren cem LV	Контрольный образец без добавок	Образец с добавкой Atren cem LV
0,5	0,00226	0,0020	0,7	0,8	0	0
1	0,002678	0,0027	1,0	0,9	0	0
1,5	0,00299	0,00303	1,2	1,1	0	0
2	0,010*	0,00321	1,5	1,3	0,7	0
2,5	-	0,00346	-	1,4	-	0
3	-	0,0266*	-	1,5	-	0,4

Примечание. *Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} .

На покрытия с добавками полисахаридов Atren Cem LV трещины появляются только при нагрузке 3 кгс. Средняя длина образовавшихся трещин при нагрузке 3 кгс на покрытия с добавкой полисахаридов Atren Cem LV в 1,75 раза меньше, чем на исходном покрытии (без добавок) при нагрузке 2 кгс. Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} у контрольных образцов составляет $0,010 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, а у образцов с добавками полисахаридов Atren Cem LV – $0,0266 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Таким образом, структура известковых покрытий, характеризующаяся наличием меж- и внутрикристаллических органических молекул, способствует повышению

эксплуатационной стойкости. Установлено повышение марки по морозостойкости с F25 (контрольный) до F35 (с добавкой полисахарида). Методом внедрения индентора Виккерса исследована трещиностойкость покрытий, определены коэффициент интенсивности напряжений покрытия и повреждаемость поверхности покрытий. Коэффициент интенсивности напряжений с добавками полисахаридов после 25 циклов замораживания-оттаивания в 2,6 раза выше по сравнению с исходным покрытием и составил: для исходного покрытия – $0,010 \text{ МПа м}^{1/2}$, для покрытия с добавкой полисахарида – $0,0266 \text{ МПа м}^{1/2}$. Показано, что коэффициент повреждаемости поверхности покрытия с добавкой полисахарида Atren Cem LV в 2 раза ниже по сравнению с исходным покрытием и составляет: для контрольных образцов – $1,93 \cdot 10^3 \text{ 1/м}^{1/2}$, с добавкой полисахарида – $0,950 \cdot 10^3 \text{ 1/м}^{1/2}$.

Установлено, что введение в рецептуру известкового состава добавки полисахаридов Atren Cem LV приводит к значительному упрочнению покрытия и расширяет возможности использования данного покрытия при отделке и реставрации стен зданий.

Список литературы

1. Alvarez, L.W. Search for hidden chambers in the pyramids: the structure of the Second Pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption / L.W. Alvarez, J.A. Anderson, F.E. Bedwei [et al.] // Science. – 1970. – 167. – 832-9.
2. Song, Y., Pan, J., editor. Tian Gong Kai Wu Yi Zhu. Shanghai: Shanghai Classics Publishing House; 2008. (in Chinese) Available from: <https://book.douban.com/subject/3156435/>
3. Пухаренко, Ю.В. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей / Ю.В. Пухаренко, А.М. Харитонов, Н.Н. Шангина, Т.Ю. Сафонова // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 1. – С. 98–103.
4. Чулкова, И.Л. Известково-реставрационные композиты / И.Л. Чулкова // Вестник СибАДИ. – 2012. – № 5. – С. 71–77.
5. Комохов, П.Г. Золь-гель как концепция нанотехнологии цементного композита / П.Г. Комохов // Строительные материалы. – 2006. – №9. – С. 14–15.
6. Комохов, П.Г. Нанотехнология радиационностойкого бетона / П.Г. Комохов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – № 5. – С. 22–23.
7. Копаница, Н.О. Применение нанодисперсного кремнезема в производстве строительных смесей / Н.О. Копаница, Ю.С. Саркисов, О.В. Демьяненко // Вестник ТГАСУ. – 2026. – № 5. – С. 140–146.
8. Селяев, В.П. Влияние структуры цеолитсодержащих композитов на долговечность бетона. Современные проблемы строительного материаловедения: материалы V Акад. чтений / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина; Рос. акад. архитектуры и строит. наук. – Воронеж, 1999. – С. 394–398.
9. Логанина, В.И. Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Л.В. Макарова, М.А. Садовникова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 4 (652). – С. 37–42.
10. Логанина, В.И. Повышение водостойкости известковых составов / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, К.А. Сергеева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – №1. – С. 42–46.
11. Логанина, В.И. Структура и свойства тонкодисперсных наполнителей на основе силикатов кальция для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, К.А. Сергеева // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – №2(31). – С. 167–169.
12. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органоминеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов,

Т.Н. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 9 (609). – С. 36–39.

13. Логанина, В.И. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, Э.Р. Акжигитова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 3. – С. 8–12.

14. Bakolas, A. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin–lime pastes / A. Bakolas, E. Aggelakopoulou, S. Anagnostopoulou, A. Moropoulou // J. Therm. Anal. Calorim. – 2006. – 84 (1). – P. 157–163.

15. Zheng, Y. A new method in detecting the sticky rice component in traditional Chinese tabia / Y. Zheng, H. Zhang, B.J. Zhang, L.H. Yue // Archaeometry. – 2016. – 58. – 218–229.

16. Liu, H. Influence of sticky rice and anionic polyacrylamide on the crystallization of calcium carbonate in chinese organic sanhetu / H. Liu, C. Peng, M. Dai, Q. Gu, S. Song // Surf Rev Lett. – 2015. – 22.1550073.

17. Loganina, V. Physical and Mechanical Properties of Lime Coatings with the Additive of Polysaccharides / Valentina Loganina, Vadim Pylaev // E3S Web of Conferences. – 2024. – 533. – 01002 (2024). – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453301002>

References

1. Alvarez, L.W. Search for hidden chambers in the pyramids: the structure of the Second Pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption / L.W. Alvarez, J.A. Anderson, F.E. Bedwei [et al.] // Science. – 1970. – 167. – 832–9.

2. Song, Y., Pan, J., editor. Tian Gong Kai Wu Yi Zhu. Shanghai: Shanghai Classics Publishing House; 2008. (in Chinese) Available from: <https://book.douban.com/subject/3156435/>

3. Pukharensko, Yu.V. Restoration of historical objects using modern dry building mixtures / Yu.V. Pukharensko, A. M. Kharitonov, N.N. Shangina, T. Yu. Safonova // Bulletin of Civil Engineers. – 2011. – No. 1. – P. 98–103.

4. Chulkova, I.L. Lime-restoration composites / I.L. Chulkova // Bulletin of SibADI. – 2012. – No. 5. – P. 71–77.

5. Komokhov, P.G. Sol-gel as a concept of cement composite nanotechnology / P.G. Komokhov // Construction materials. – 2006. – No. 9. – P. 14–15.

6. Komokhov, P.G. Nanotechnology of radiation-resistant concrete / P.G. Komokhov // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. – 2006. – No. 5. – P. 22–23.

7. Kopanitsa, N.O. Application of nanodispersed silica in the production of building mixtures / N.O. Kopanitsa, Yu.S. Sarkisov, O.V. Demyanenko // Bulletin of TGASU. – 2026. – № 5. – P. 140–146.

8. Selyaev, V.P. The influence of the structure of zeolite-containing composites on the durability of concrete. Modern problems of construction materials science: materials V acad. readings / V.P. Selyaev, L.I. Kupriyashkina ; Ross. acad. Architecture and builds. Sci. – Voronezh, 1999. – P. 394–398.

9. Loganina, V.I. Rheological properties of composite lime binder using synthetic zeolites / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, L.V. Makarova, M.A. Sadovnikova // News of higher educational institutions. Construction. – 2013. – No. 4 (652). – P. 37–42.

10. Loganina, V.I. Increasing the water resistance of lime compositions / V.I. Loganina, L.V. Makarova, K.A. Sergeeva // Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhova. – 2012. – №1. – P. 42–46.

11. Loganina, V.I. Structure and properties of fine fillers based on calcium silicates for dry building mixtures / V.I. Loganina, L.V. Makarova, K.A. Sergeeva // Bulletin of Civil Engineers. – 2012. – No. 2(31). – P. 167–169.

12. Loganina, V.I. Prospects for the production of organomineral additives based on domestic raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, V.N. Gorbunov, T.N. Dmitrieva // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – № 9 (609). – P. 36–39.

-
13. Loganina, V.I. Development of organomineral additives for dry construction mixtures / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, E.R. Akzhigitova // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. – 2022. – No. 3. – P. 8–12.
14. Bakolas, A. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin–lime pastes / A. Bakolas, E. Aggelakopoulou, S. Anagnostopoulou, A. Moropoulou // J. Therm. Anal. Calorim. – 2006. – 84 (1). – P. 157–163.
15. Zheng, Y. A new method in detecting the sticky rice component in traditional Chinese tabia / Y. Zheng, H. Zhang, B.J. Zhang, L.H. Yue // Archaeometry. – 2016. – 58. – P. 218–229.
16. Liu, H. Influence of sticky rice and anionic polyacrylamide on the crystallization of calcium carbonate in chinese organic sanhetu / H. Liu, C. Peng, M. Dai, Q. Gu, S. Song // Surf Rev Lett. – 2015. – 22.1550073.
17. Loganina, V. Physical and Mechanical Properties of Lime Coatings with the Additive of Polysaccharides / Valentina Loganina, Vadim Pylaev // E3S Web of Conferences. – 2024. – 533. – 01002 (2024). – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453301002>

УДК 691 : 519.7

DOI 10.54734/20722958_2025_3_73

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

Рыжов Антон Дмитриевич,
старший преподаватель кафедры
«Информационно-вычислительные
системы»
E-mail: penza48@rambler.ru

Кошев Александр Николаевич,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Информационно-
вычислительные системы», действительный
член Нью-Йоркской академии наук
*Институт химии твердого тела и
механохимии Сибирского отделения РАН*
Россия, 630128, Новосибирск, Кутателадзе, 18,
тел.: (383) 332-40-02

Варенцов Валерий Константинович,
доктор технических наук, профессор
E-mail: vvk@ngs.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

Ryzhov Anton Dmitrievich,
Senior Lecturer of the Department
«Information and computing systems»
E-mail: penza48@rambler.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
*Institute of Solid and Mechanochemistry of
the Siberian Branch of RAS*
Russia, 630128, Novosibirsk, 18, Kutateladze St.,
tel.: (383) 332-40-02

Varentsov Valery Konstantinovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: vvk@ngs.ru

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00135,
<https://rscf.ru/project/25-21-00135/>.

ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ РЕАКЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕГРАФИТОВОГО ВОЛОКНИСТОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

В.В. Кузина, А.Д. Рыжов, В.К. Варенцов, А.Н. Кошев

Приводится анализ влияния технических характеристик углеродистых волоконистых материалов, используемых для создания композиционных и наноконпозиционных материалов, на величину удельной реакционной поверхности. Показано, что удельная реакционная поверхность проточных трехмерных электродов (ПТЭ) должна рассматриваться, как один из параметров, подлежащих оптимизации. При этом возможность подбирать материалы для формирования ПТЭ позволяет рассматривать катоды с распределенной по толщине ПТЭ удельной реакционной поверхностью.

Ключевые слова: углеродные волокнистые материалы, композиционные и наноконпозиционные материалы, проточные трехмерные электроды, реакционная поверхность, параметр оптимизации

THE CHANGE OF SPECIFIC REACTION SURFACE OF CARBON GRAPHITE FIBER ELECTRODE AT GALVANIC METALLIZATION

V.V. Kuzina, A.D. Ryzhov, V.K. Varentsov, A.N. Koshev

The analysis of the influence of technical characteristics of carbon graphite fiber materials used for creation of composite and nanocomposite materials on the value of specific reaction surface is given. It is shown that specific reaction surface of flowing three-dimensional electrodes (FTE) should be considered as one of the parameters to be optimized. At the same time, the possibility to select

materials for FTE formation allows to consider cathodes with specific reaction surface distributed along the thickness of FTE.

Keywords: carbon fiber materials, composite and nanocomposite materials, flowing three-dimensional electrodes, reaction surface, optimization parameter

Введение. Использование углеграфитовых волокнистых материалов (УВМ) при создании композиционных и наноконпозиционных материалов посредством гальванической металлизации предполагает изучение влияния технических характеристик УВМ на их технологические свойства и возможность получения качественных, равномерных металлических покрытий углеграфитовых катодов. В данной работе рассмотрена корреляция между удельной реакционной поверхностью, радиусом волокна и пористостью углеграфитового материала.

Удельная реакционная поверхность может рассматриваться как один из важных параметров при определении конструкционных особенностей и технологического режима процесса гальванической металлизации углеграфитового материала в проточных трехмерных электродах (ПТЭ) с катодами на основе углеродных волокнистых материалов. Это обусловлено тем, что, с одной стороны, реакционная поверхность УВМ является одной из основных характеристик, обеспечивающих интенсификацию электрохимического процесса извлечения металлов при металлизации УВМ из электролитов в проточном трехмерном электроде, а с другой – тем, что величину удельной реакционной поверхности можно изменять посредством сжатия или растяжения материала.

Исследование корреляции между удельной реакционной поверхностью, радиусом волокна и пористостью углеграфитового материала необходимо проводить исходя из условий динамического изменения перечисленных параметров ПТЭ в процессе покрытия металлом углеграфитовых волокон.

Построение уравнений регрессии. Нами проведена статистическая обработка данных, представленных в табл. 1 [1], при этом игнорировались различия в исходных материалах и технологиях изготовления рассмотренных марок УВМ. Исследовалась зависимость удельной поверхности S от радиуса волокон r и пористости материала ε вида

$$S = a_0 + a_r r + a_\varepsilon \varepsilon + a_{r\varepsilon} r\varepsilon. \quad (1)$$

Такой вид зависимости обусловлен тем, что наиболее значимыми факторами влияния на величину удельной реакционной поверхности S являются радиус волокон r и пористость материала ε .

Всего было рассмотрено 12 моделей, некоторые расчетные параметры приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Зависимая переменная	R	F_p	F_T	a_0	a_r	a_ε	$a_{r\varepsilon}$
1	2	3	4	5	6	7	8
S_v	0,569	4,799	1,9	1455,23	–	–13,3140	–
S_v	0,587	2,364	1,9	1571,07	–13,7706	–13,7783	–
S_v	0,663	1,784	2,0	–389,25	991,1736	43,2331	–10,4777
S_M	0,491	3,184	1,9	1409,67	–	–12,4302	–
S_M	0,652	3,331	1,9	1788,05	–44,9813	–13,9470	–
S_M	0,684	2,351	2,0	–3385,78	905,844	39,9942	–9,9134
S_v°	0,838	23,64	1,9	5485,63	–588,885	–	–
S_v°	0,850	11,74	1,9	3066,93	–574,911	24,5670	–

1	2	3	4	5	6	7	8
S_v	0,851	6,993	2,0	8297,07	-1536,08	-29,9613	10,0213
S_M	0,789	16,53	1,9	9958,23	-1302,55	—	—
S_M^*	0,808	8,49	1,9	2987,07	-1262,27	70,8069	—
S_M^*	0,808	5,031	2,0	-1371,11	-461,346	116,244	-8,3506

Кроме того, рассматривалась корреляция между удельными площадями поверхности, определенными рассматриваемыми методами, в простейших двучленных регрессионных моделях [2]. Соответствующие результаты приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Зависимая переменная	Независимая переменная	R	F_p	F_T	a_0	a_1
S_M	S_v	0,031	0,019	1,9	2470,350	2,31222
S_M^*	S_v^*	0,103	0,107	1,9	2831,516	4,99667
S_v^*	S_v	0,900	42,865	1,9	43,582	0,14879
S_M^*	S_M	0,859	28,142	1,9	-1704,229	0,38038

В обеих таблицах для каждой из рассмотренных моделей вычислены коэффициент корреляции R , расчетное F и табличное F_T значения критерия Фишера при уровне значимости $\beta = 0,8$.

Исследование корреляционных моделей показывает, что без ущерба для точности можно рассматривать только линейные связи между изучаемыми величинами. Нетрудно видеть также, что при высоком коэффициенте корреляции справедливы модели:

$$S_v^* = 3066,93 - 574,911r + 24,567\varepsilon; \quad (2)$$

$$S_M^* = 2987,07 - 1262,27r + 70,807\varepsilon. \quad (3)$$

Относительные ошибки моделей (2) и (3) равны соответственно 5,8 % и 12 %.

Построенные модели могут использоваться для оценки удельной поверхности, если известны радиус волокон и пористость УВМ, при этом следует заметить, что они получены для $4,5 \leq r \leq 6,1$ (мкм) и $92 \leq \varepsilon \leq 98$ %, поэтому их нельзя экстраполировать для r и ε , сильно выходящих за границы означенных интервалов. По этой же причине они могут оказаться малопригодными для определения удельной поверхности ПТЭ при электроосаждении металла внутри пористого пространства, когда r и ε изменяются значительно.

Построение математических моделей для коррекции величин S , r и ε в процессе металлизации УВМ. В случае, когда радиус волокна УВМ, пористость материала и, как следствие, его удельная реакционная поверхность значительно меняются в процессе осаждения металла, необходимо учитывать эти изменения при математическом моделировании процесса электролиза.

Для нахождения зависимости удельной площади поверхности УВМ S_v от веса осадка металла M , в первом приближении, считалось, что осадок распределяется вдоль волокон равномерно. При известной пористости материала можно найти объем волокон, составляющих «таблетку» УВМ площадью 1 см^2 и толщиной 1 см , и определить n – число волокон в таблетке, полагая, что каждое из волокон представляет цилиндр известного радиуса r : $n = (1 - \varepsilon)/(\pi r^2)$.

При осаждении M граммов металла с плотностью q , г/см³, радиус волокон и пористость электрода становятся равными соответственно

$$r_M = \sqrt{r^2 + \frac{M}{\pi q n}}; \quad \varepsilon_M = \varepsilon - \frac{M}{q}, \quad (4)$$

а удельная поверхность

$$S_v = 2\pi r_M n = \frac{2(1-\varepsilon)}{r} \sqrt{1 + \frac{M}{q(1-\varepsilon)}}. \quad (5)$$

Покажем величину изменения удельной реакционной поверхности от количества осажденного металла для $r = 5 \cdot 10^{-4}$ см, $\varepsilon = 0,95$. Для этих значений можно принять $n \approx 6 \cdot 10^4$. В начале процесса $r_M = r$, и из формулы (5) находим $S_v = 200$ см. Найдем $S_v^{\max}$, когда на ПТЭ осаждено максимально достигаемое на практике количество металла. Для золота это приблизительно $M = 40$ г на 1 г УВМ. Считая плотность углерадита равной 1,6 г/см³ [3], нетрудно определить, что на рассматриваемый объем УВМ можно осадить 3,2 г металла. Для золота $q = 19,6$ г/см³. Подставляя эти данные в (4), (5), найдем $S_v^{\max} \approx 413$ см³. Таким образом, определено, что в данном случае может происходить удвоение удельной поверхности ПТЭ за весь цикл осаждения металла из раствора. Очевидно, что при решении задач по определению технологических параметров процесса извлечения металлов на ПТЭ необходимо учитывать возможные изменения величин удельной поверхности, пористости, линейной скорости потока электролита и др. в динамике электролиза.

Для вычисления удельной реакционной поверхности S_v по уравнению (5) необходимо знать количество металла и его прирост с течением времени работы ПТЭ:

$$M(x, \tau) \text{ и } \frac{\partial M}{\partial x}(x, \tau), \quad 0 \leq x \leq L.$$

Пусть $(M(x, \tau + \Delta\tau) - M(x, \tau))\Delta x$ – привес металла за время Δt для элементарного объема ПТЭ с единичным сечением и толщиной Δx ; $\Delta C = C(x, \tau) - C(x + \Delta x, \tau)$ – изменение концентрации элементарного объема электролита при прохождении его от точки x до точки $(x + \Delta x)$; $\Delta C \cdot m_v$ – изменение концентрации в элементарном объеме при прохождении от точки x до точки $(x + \Delta x)$ в единицу времени; $\Delta C \cdot m_v \cdot \Delta\tau$ – то же за время Δt или, что то же самое, количество металла, осевшего в элементарном объеме в ПТЭ с единичным сечением и толщиной Δx в точке x . Запишем равенство:

$$(M(x, \tau + \Delta\tau) - M(x, \tau))\Delta x = \Delta C \cdot m_v \cdot \Delta\tau.$$

Устремляя интервалы по времени и по толщине электрода к нулю, получаем:

$$M(x, \tau) = m_v dx \int_0^\tau \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} dt.$$

Рассчитанное по этой формуле количество металла, осажденного в точке x за время τ , можно использовать при расчете удельной поверхности $S_v(x, \tau)$ по формуле (5).

Заключение. Представленные сведения позволяют сделать вывод о том, что удельная реакционная поверхность ПТЭ должна рассматриваться как один из параметров, подлежащих оптимизации. Более того, возможность подбирать материалы для формирования ПТЭ (см. табл. 1 [1]) позволяет рассматривать катоды с распределенной по толщине ПТЭ удельной реакционной поверхностью. Отметим также, что изменить значение S_v возможно за счет сжатия или растяжения выбранного материала катода.

Список литературы

1. Варенцов, В.К. Реакционная поверхность, как одна из важнейших характеристик композитов и нанокompозитов, создаваемых на основе металлизации углерадитовых

волокнистых материалов / В.К. Варенцов, В.В. Кузина, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63).

2. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов/ В.Е. Гмурман. – 10-е издание, стереотипное. – Москва : Высшая школа, 2004. – 479 с. – ISBN 5-06-004214-6.

3. Варенцов, В.К. Электрохимические реакторы с УВЭ: разработка и использование / В.К. Варенцов // Химия в интересах устойчивого развития. – 1997. – № 2. – С. 147–156.

References

1. Varentsov, V.K. Reaction surface as one of the most important characteristics of composites and nanocomposites created on the basis of metallization of carbon-graphite fibrous materials / V.K. Varentsov, V.V. Kuzina, A.N. Koshev // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 2 (63).

2. Gmurman, V.E. Probability theory and mathematical statistics : textbook for universities/ V.E. Gmurman. – 10th edition, stereotyped. – Moscow : Higher School, 2004. – 479 p. – ISBN 5-06-004214-6.

3. Varentsov, V.K. Electrochemical reactors with UVE: development and use / V.K. Varentsov // Chemistry for sustainable development. – 1997. – No. 2. – P. 147–156.

Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)
Россия, 308012, Белгород,
ул. Костюкова, д. 46

Шаповалова Анастасия Валерьевна,
аспирант
E-mail: asasapov97@mail.ru

Агеева Марина Сергеевна,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: ageevams@yandex.ru

Клюев Сергей Васильевич,
доктор технических наук, профессор
E-mail: klyuyev@yandex.ru

Клюев Александр Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: klyuyevav@yandex.ru

Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov
(BSTU named after V.G. Shukhov)
Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.

Shapovalova Anastasya Valerievna,
Postgraduate student
E-mail: asasapov97@mail.ru

Ageeva Marina Sergeevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: ageevams@yandex.ru

Klyuev Sergey Vasilievich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: klyuyev@yandex.ru

Klyuev Aleksander Vasilievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: klyuyevav@yandex.ru

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00426
с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ТОНКОМОЛОТЫЕ ДОБАВКИ ДЛЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА И НАНОЗОЛЫ

А.В. Шаповалова, М.С. Агеева, С.В. Клюев, А.В. Клюев

Представлены результаты экспериментального исследования по приготовлению самоуплотняющейся бетонной смеси из тонкомолотого порошка, полученного путем обработки отходов теплоизоляционного материала с использованием сельскохозяйственных отходов, представляющих собой измельченную золу жома сахарной свеклы, в качестве замены цемента. Рассмотрена зависимость удельной поверхности от времени помола исходного материала. Получены микрофотографии нанозолы жома, и проведен РФА-анализ обожженного дефекаата. Результаты показали, что лучшие механические характеристики были у образцов с процентным соотношением 1:3 порошка «Извола» (ОВВ) и нанозолы дефекаата (ОД) по отношению к массе цемента (до 3 %). Оптимальным для разработки бетонной смеси можно считать диапазон 1–5 %. При увеличении количества нанозолы начинает возрастать порообразование, снижаются прочность на сжатие и усадка.

Ключевые слова: строительные материалы, вторично переработанные материалы, самоуплотняющиеся бетоны, тонкомолотые активные добавки, переработанные отходы сельскохозяйственного производства, отходы минерального тепловолокна

FINE-GROUND ADDITIVES FOR CONCRETE MIXTURE BASED ON TECHNOGENIC FIBROUS MATERIAL AND NANOASH

A.V. Shapovalova, M.S. Ageeva, S.V. Klyuev, A.V. Klyuev

This article presents the results of an experimental study on obtaining a self-hardening concrete mixture from finely ground powder obtained by processing heat-insulating material waste using agricultural waste obtained by grinding sugar beet pulp ash as a substitute for cement. The dependence of the specific surface on the grinding time of the original material is considered. Microphotographs of pulp nanoash have been obtained and X-ray diffraction analysis of the burned defecate has been carried out. The results have showed that the best mechanical properties are in samples with a percentage ratio of 1:3 of Izowol powder (OBV) and defecate nanoash (OD) in

relation to the mass of cement (up to 3 %). The range of 1-5 % can be considered optimal for the development of concrete mixture. With an increase in the amount of nanoash, pore formation begins to increase, compressive strength and shrinkage decrease.

Keywords: building materials, recycled materials, self-compacting concrete, fine ground active additives, recycled agricultural waste, mineral wool waste

Постановка задачи. В связи с ежегодно увеличивающимися темпами строительства растет спрос на цемент. Портландцемент – дорогостоящий материал, стоимость которого неизменно влияет на стоимость зданий и сооружений. Невозможно отказаться от цемента как от основного вяжущего строительной смеси. В данных условиях общество сталкивается с необходимостью снижения или частичной замены количества используемого цемента в строительных смесях без потери эксплуатационных характеристик полученного материала.

С другой стороны, открытым остается вопрос ресурсосбережения и экологии производства. Актуальны исследования, направленные на рассмотрение вторичных продуктов производства как компонентов для производства готового продукта или изделия.

Согласно анализу данных, полученных за несколько последних десятилетий [3–6], весьма успешной является замена цемента на пуццолановые материалы, к которым можно отнести базальтовые порошки различной этимологии (природные и техногенные).

Многие ученые пытались использовать органические отходы в различных областях промышленности, в том числе и в строительной отрасли. Такие работы проводились в США, Египте, Бразилии, Китае, Аргентине, некоторые из решений нашли свое применение в строительной индустрии [2–9].

Теоретические исследования. Российская Федерация занимает ведущее положение в области производства сельскохозяйственной продукции. Вопрос об утилизации отходов данной отрасли открыт. Например, Россия занимает ведущее место по производству сахарной свеклы, на ее долю приходится 27,65 % от мирового производства сахарной свеклы [9]. Утилизация накопившихся отходов сельскохозяйственной промышленности, в особенности сахарной промышленности, актуальна для Белгородской области как части Центрально-Черноземного района.

В настоящее время отходы сахарного производства практически не утилизируются [4].

Данная проблема характерна не только для Российской Федерации, но и для ряда других стран [7]. В 2019 году общий объем производства сахарной свеклы в мире составлял 219921000 тонн [8]. Анализ литературных источников показал, что исследования на данную тему проводятся и весьма успешно [1, 4–6, 7–9, 12]. Согласно анализу, были выделены два исследования, имеющие комплексный обзор на похожую проблематику и объекты исследования [1, 6, 8, 9, 11]. Так, в исследованиях профессора С.А. Мостафы была успешно получена самоуплотняющаяся бетонная смесь на основе базальтовых волокон и нанозолы из переработанных продуктов сельского хозяйства – жмыха сахара, тростника, стеблей хлопка и риса. Нанозолу получали путем обжига отходов сельскохозяйственного производства в температурном диапазоне 300-900°C [6, 8, 10]. Исследование показало, что наиболее эффективным является обжиг при температуре от 500-700°C [8, 11]. Количество добавляемой нанозолы в цемент составляло от 5-20 % по массе цемента; подобное количество примешиваемой и эффективно работающей модифицированной растительной добавки подтверждается другими исследованиями. Пуццолановый компонент цементной смеси не превышал 20 % по массе цемента, но наиболее успешные результаты авторы исследования получили при вводе 5 % пуццоланового материала [12]. Полученные образцы имели на 5 % большую прочность на раскалывание, и на 2 % увеличилась прочность на изгиб. Также был замечен эффект термической стабильности образцов при нагреве в

диапазоне 100-300°C по сравнению с контрольной смесью [5–6], что предполагает возможность использования данной строительной смеси как термостабильной [7].

В работе Махмида Г. и Алла М. Р. [9] рассматривается возможность использования отходов сахарной свеклы в качестве одного из компонентов, входящих в цементный материал. Цемент частично заменялся на исследуемый материал в соотношениях 5-25 % по весу. Было исследовано влияние переработанного отхода на удобоукладываемость, сроки схватывания, общую пористость, водопоглощение и прочностные характеристики. Результаты подтвердили, что с включением 5 % по мас. отхода прочность на 3, 7 и 28-е сутки повышается соответственно на 1,47, 2,46 и 4,77 %; с включением 10–25 % по мас. отхода уменьшается плотность, но увеличивается пористость.

В целом анализ источников литературы подтверждает целесообразность разработки цемента с использованием органических материалов, необходимого для возведения промышленных и общественных зданий.

Цель исследования заключалась в постепенной разработке тонкомолотой самоуплотняющейся строительной смеси.

Задачи состояли в изучении возможности применения обработанных отходов растительного происхождения, в подборе пуццоланового компонента с учетом экологического потенциала последнего, в подтверждении вероятности получения самоуплотняющейся строительной смеси с заданными свойствами по аналогии с рецептурами подобных смесей, полученных зарубежными исследователями, в определении возможности применения местных ресурсов при получении самоуплотняющейся строительной смеси, в отдельном изучении каждого компонента добавки, в рассмотрении их совместной работы в формировании цементной матрицы.

Для успешного и более детального исследования задачи были разбиты на несколько этапов:

1. Подбор эффективного состава самоуплотняющейся смеси с использованием всех заявленных материалов. Изучение ее прочностных характеристик и возможности применения.
2. Испытание полученной смеси на термостабильность и ее практическое применение.

Материалы и методы исследований. Используемые методы и материалы: портландцемент ЦЕМ II/A-III 42,5Н; мытый кварцевый песок (ООО «Песчаный карьер»); вода (Белгородский горводоканал); отход минеральной базальтовой ваты «Извол»; полифункциональный модификатор POLIFROM P4.

Все физико-механические характеристики цемента определяли согласно методикам ГОСТ 310.3-76, ГОСТ 310.4-81, ГОСТ 8735-88.

Обжиг дефеката сахарной свеклы производили в муфельной печи LF-7/11-G1.

Физико-химические свойства определяли с помощью рентгенофазового анализа на рентгенофлуоресцентном спектрометре серии ARL 9900 WorkStation; PCX-10a.

Микроструктуру образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3MLU.

Для разработки экологически чистой самоуплотняющейся цементной смеси использовали отходы местного производства минераловатного утеплителя «Извол» в качестве пуццоланового компонента строительной смеси. В табл. 1 приведены некоторые характеристики отходов. Был проведен помол исходного отхода минераловатного утеплителя до $S_{уд}=3000 \text{ см}^2/\text{г}$. На рис. 1 представлен исходный и полученный материал.

Т а б л и ц а 1

Характеристика ОБВ «Извол»

Насыпная плотность, кг/м ³	1131–13671
Истинная плотность кг/м ³	2798–2881
Удельная поверхность, м ² /кг	161–183

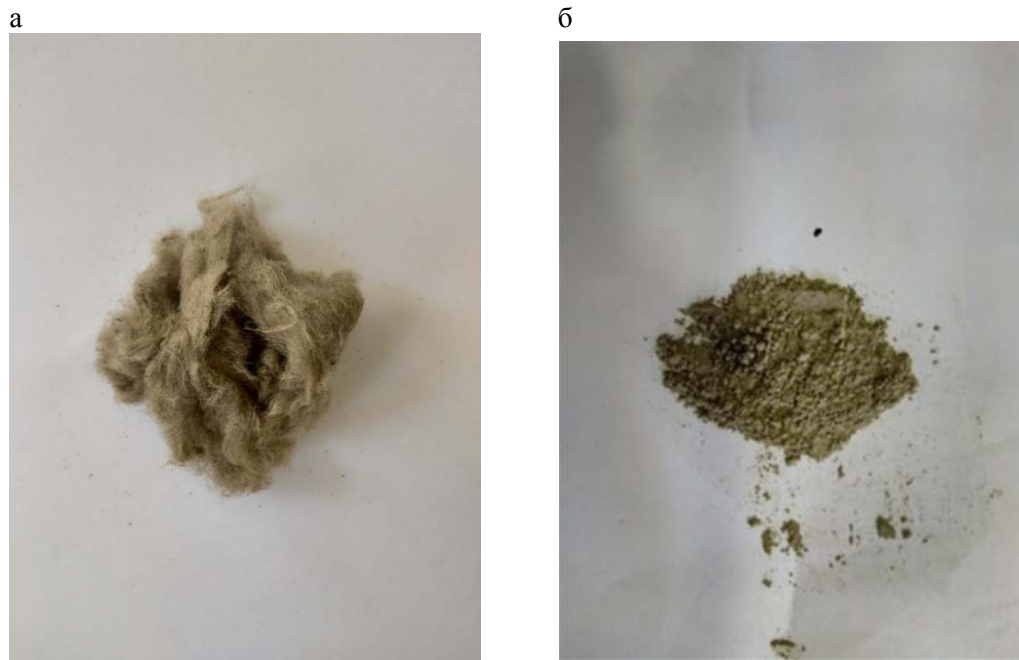


Рис. 1. Минераловатное волокно «Извол»:
а – исходный вид ОБВ «Извол»; б – ОБВ после помола

Дополнительная механоактивация материала способствует в дальнейшем получению более плотной упаковки частиц внутри цементной матрицы за счет высвобождения дополнительной энергии и достижению более плотного контакта между частицами проектируемой смеси.

Согласно рис. 2, оптимальный временной диапазон для проведения полной механоактивации минераловатного материала составил 90–120 с.

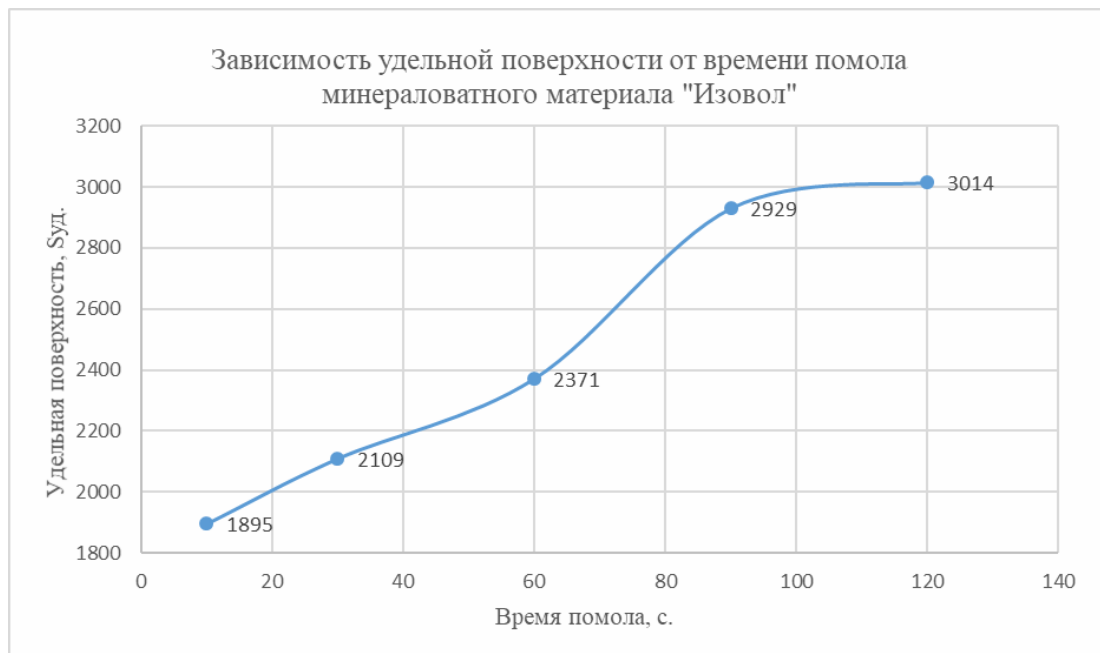


Рис. 2. Удельная поверхность минераловатного материала «Извол»

Т а б л и ц а 2

Химический состав ОБВ (мас. %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
44,1	12,26	9,44	16,2	13,19	2,2	0,78	1,42

В целях снижения экологической нагрузки и уменьшения экономических затрат применяли отход переработки сахарной свеклы в виде жома. На территории Белгородской области действует 8 заводов по переработке сахарной свеклы. Ежегодно при получении основного продукта (сахара), образуется около 12 тонн свекольного жома. Небольшая часть используется в мелиоративных целях на сельскохозяйственных угодьях, гораздо большие объемы сельскохозяйственного отхода так и не находят своего применения. На рисунках представлен исходный вариант дефеката (ИД), полученного напрямую с предприятия и прошедшего термическую обработку в течение 1,5 часа при температуре 500°C.

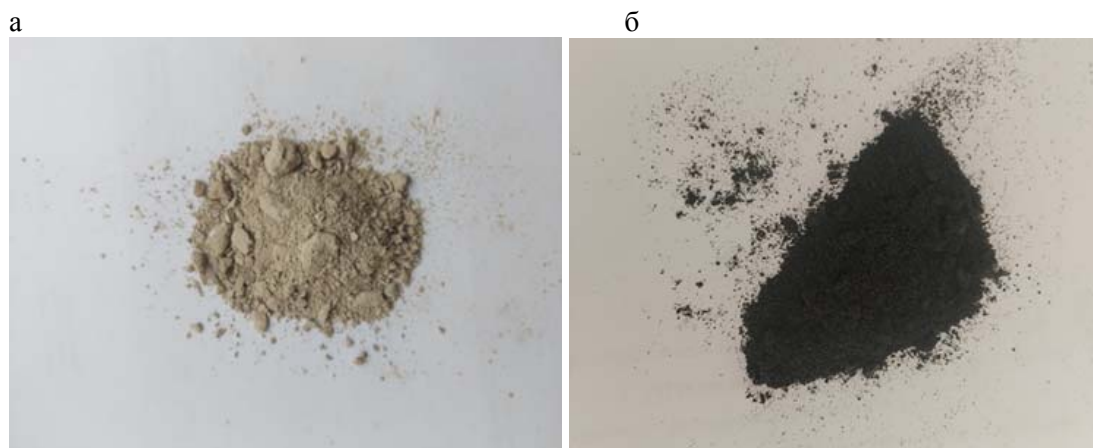


Рис. 3. Обработка дефеката для получения нанозолы:
а – исходный дефекат; б – обожженный при 500°C

Ниже представлены некоторые характеристики нанозолы ОД.

Т а б л и ц а 3

Характеристика нанозолы ОД

Насыпная плотность, кг/м ³	1240
Истинная плотность кг/м ³	2320
Удельная поверхность, м ² /кг	194

Т а б л и ц а 4

Элементный состав нанозолы ОД в зависимости от времени обжига при 900°C

Часы	O	Ca	C	Mg	Si	P	Al
1	41,7	27,2	23,6	2,9	2,2	1,3	1
2	50,4	26,3	18,2	2,4	1,6	0,8	0,3
3	45,3	33,9	15,4	2,5	1,5	1,1	0,4
4	43,6	28,6	20,8	3,1	1,7	1,8	0,4
Ср.знач.	45,25	29	19,5	2,73	1,75	1,25	0,52

Для определения влияния температуры обжига ИД на его минералогический состав пробы ИД, прошедшего стадию обжига при разных температурах, подвергали рентгенофазовому анализу.

Результаты РФА свидетельствуют об образовании углерода при обугливание органических веществ, содержащихся в исходном материале. Также можно наблюдать остатки кальциевых солей, что может отразиться на протекании реакций гидратации цемента, так как полученный тонкомолотый базальтовый порошок имеет пуццолановую природу. К сожалению, нельзя говорить о полном избавлении от органической части, однако при обжиге исходного свекольного дефеката большая ее часть распа-

дается на оксиды и остатки солей, что делает данный материал пригодным для применения в техногенных материалах, к каким относятся строительные смеси. В исследовании [2, 9] был предложен температурный диапазон 500-700°C обжига растительного продукта.

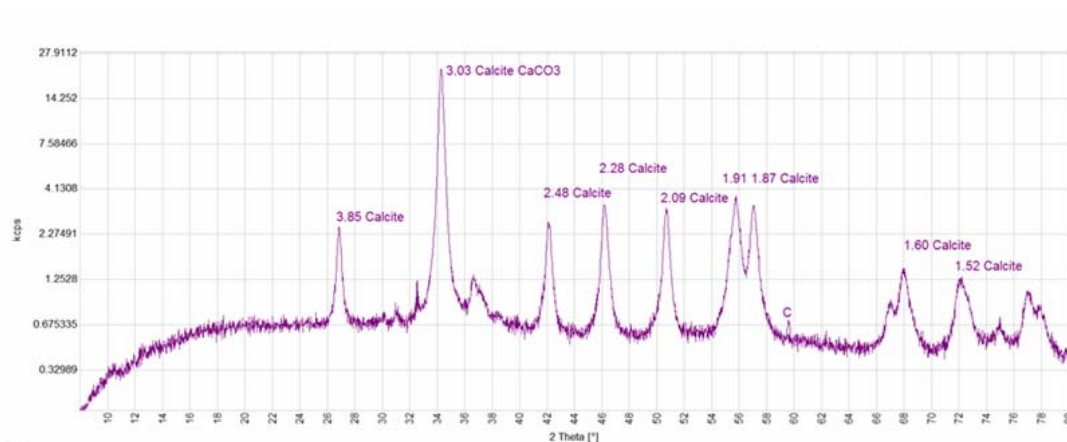


Рис. 4. Результаты РФА термически модифицированного дефекта свекольного жома



Рис. 5. Микрофотография нанозолы свекольного жома

Нанозола ОД представляет собой конгломераты микросфер с шереховатой поверхностью, с размерами 30 мкм. Можно предположить, что частицы нанозолы ОД будут встраиваться между частицами вяжущего и более крупного наполнителя, тем самым создавая более плотную упаковку частиц, что способствует лучшей гомогенизации смеси и отражается на прочностных показателях цемента, удобоукладываемости, долговечности цементного камня [6, 8, 11].

Полученные результаты. При исследовании отдельно каждого компонента будущей цементной смеси получили обнадеживающие результаты, сходные с данными, полученными зарубежными коллегами [1, 4, 9]. Также были изучены прочностные характеристики цементной системы. Мы столкнулись с проблемой увеличения количества воды для затворения цементного состава, что не может не отразиться на условиях гидратации и твердения, получения равномерной цементной структуры, а значит, и снижения прочностных характеристик. Для уменьшения количества воды и получения пластичной цементной массы в исследовании была использована полифункциональная добавка POLIFROM P4. Идея заключалась в исследовании возможности применения отхода базальтового волокна и механоактивированных предварительно обожженных отходов сельского хозяйства для получения тонкомолотой

бетонной смеси, используемой для строительства построек хозяйственного и жилого назначения.

Разработка строительной смеси осуществлялась согласно методикам проф. С.А. Мос-тафы, Махмида Г. и Алла М.Р. [9]. Были заформованы образцы-кубики размером 3×3×3 с добавкой изовола 5 % по массе цемента и нанозолы жома от 1 до 5 % [9]. Полученные образцы содержат одинаковое количество вяжущего, заполнителя, тонкомолотого отхода изовола (ОБВ). Образцы различаются по содержанию нанозолы ОД от 1-5 %. В табл. 5 представлены данные, полученные при измерении прочности на сжатие образцов на 7-е и 28-е сутки.

Т а б л и ц а 5

Результаты измерения прочности на сжатие исследуемых образцов

№ п/п	Ц, г	П, г	В/Ц	ОБВ*, %	Пл*, %	ОД*, %	ρ, г/см ³	M, г	Размеры, см	R, МПа	
										7 сут	28 сут
1	100	200	0,35	5	1	1	2,5	58,3	2,9×2,9×2,8	37,16	53,45
2	100	200	0,35	5	1	2	2,5	60	2,8×3×2,8	35,71	51,17
3	100	200	0,35	5	1	3	2,3	55	3×2,8×2,7	35,13	48,20
4	100	200	0,35	5	1	4	2,4	60	3×2,8×2,9	32,36	45,76
5.	100	200	0,35	5	1	5	2,3	60	2,9×3×3	25,9	35,44
6**	100	200	0,35	-	1	-	2,5	63	3×3×2,9	35,83	45,95

* – процент добавки, отсчитывался от массы цемента;

** – полученные данные по контрольному образцу

Согласно полученным данным целесообразна замена цемента нанозолой ОД до 3 %. Такой эффект объясняется эффектом наполнителя, обеспечивающим большую площадь поверхности для процесса гидратации и структурообразования цементного камня; дальнейшее увеличение нанозолы в цементной смеси приводит к снижению прочностных характеристик цементного камня, что объясняется в работе [9] ростом пористости в образцах и снижением прочностных характеристик. Лучшим вариантом оказался образец, содержащий 2 % нанозолы ОД. В цементной смеси с 4 % содержанием нанозолы дефекта наблюдалось расслоение при формовании образцов.

Выводы. Таким образом, наибольшую эффективность показала добавка нанозолы ОД для замещения бетона 1-3 %. Благодаря дополнительному введению порошка ОБВ прочностные характеристики имели прирост по сравнению с контрольным образцом. Большие опасения вызывало взаимодействие нанозолы ОД и ОБВ; согласно источникам, некоторые пуццолановые заполнители в бетонах в процессе эксплуатации под действием негативных естественных факторов способны вступать в реакцию со щелочами, что приводит к вспучиванию и саморазрушению. На стадии формования образцов, а также определения сроков схватывания и твердения цементной смеси, в которую добавлен порошок ОБВ «Извол» с нанозолой ОД, активной реакции вспучивания, выделения мелких пузырей не было отмечено. При разломе образцов наблюдали однородную цементную матрицу без образования слоев и мелких пустот. Наибольшую прочность показали образцы с процентным соотношением 1:3 ОБВ «Извола» и нанозолы ОД по отношению к массе цемента.

Рекомендации для будущего исследования:

- Провести рентгенофазовый анализ образцов с оптимальным соотношением нанозолы ОД и ОБВ «Извола». Изучить структуру полученной цементной смеси.
- Изучить прочностные характеристики смеси при разных способах твердения.
- Определить прочностные характеристики и термостабильность полученной бетонной смеси, а также термостабильность полученного цемента в зависимости от способа твердения смеси.
- Рассмотреть инертность материала по отношению к щелочам и кислотам и их влияние на цементный камень и его структуру.

Список литературы

1. Alkaysi, M. Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC) / M. Alkaysi, S. El-Tawil, Z. Liu, W. Hansen // *Cement and Concrete Composites*. – 2016. – Vol. 66. – P. 47–56. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.005>.
2. Li, Y. Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete based on waste basalt powder for Sichuan-Tibet Railway / Y. Li, X. Zeng, J.L. Zhou, Y. Shi, H.A. Umar, G. Long, Y. Xie // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 312. – P. 127775. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127775>.
3. Arafa, M. Mechanical properties of ultra-high performance concrete produced in the Gaza strip Asian / M. Arafa, S. Shihada, M. Karmout // *Journal of Materials Science*. – 2010. – Vol. 2. – P. 1–12. – URL: <https://scialert.net/abstract/?doi=ajmskr.2010.1.12>.
4. Потасова, М.В. Перспективные направления использования отходов сахарного производства / М.В. Протасова, С.Ю. Миронов, О.В. Лукьянчикова, Л.А. Бабкина // *Auditorium*. – 2016. – № 2(10). – С. 32–41.
5. Klyuev, A.V. Development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials / A.V. Klyuev, N.F. Kashapov, S.V. Klyuev, R.V. Lesovik, M.S. Ageeva, E.V. Fomina, N.A. Ayubov // *Construction Materials and Products*. – 2023. – 6 (1). – P. 60–73. – URL: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73>
6. Klyuev, A.V. Experimental studies of the processes of structure formation of composite mixtures with technogenic mechanoactivated silica component / A.V. Klyuev, N.F. Kashapov, S.V. Klyuev, S.V. Zolotareva, N.A. Shchekina, E.S. Shorstova, R.V. Lesovik, N.A. Ayubov // *Construction Materials and Products*. – 2023. – 6 (2). – P. 5–18. – URL: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18>
7. Loh, Y.R. Sugarcane bagasse — The future composite material: A literature review / Y.R. Loh, D. Sujana, M.E. Rahman, C.A. Das // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2013. – Vol. 75. – P. 14–22. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.002>.
8. Amin, M. Effect of ferrosilicon and silica fume on mechanical, durability, and microstructure characteristics of ultra high-performance concrete / M. Amin, A.M. Zeyad, B.A. Tayeh, Agwa I. Saad // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 320. – P. 126233. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126233>.
9. Gharieb, M. An initial study of using sugar-beet waste as a cementitious material / M. Gharieb, A.M. Rashad // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 250. – P. 118843. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118843>.
10. Thomas, B.S. Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: a comprehensive review / B.S. Thomas, J. Yang, K.H. Mo, J.A. Abdalla, R.A. Hawileh, E. Ariyachandra // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 40. – P. 102332. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102332>.
11. Klyuev, S. Wastes from the production of heat-insulating basalt wool as an additive in cement-based materials / S. Klyuev, A. Klyuev, E. Fomina, E. Shorstova, M. Ageeva, I. Nedoseko, L. Sabitov, V. Shamanov, R. Shayakhmetov, Y. Liseitsev // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 19. – P. 02347. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02347>.
12. Klyuev, S.V. Technogenic sands as effective filler for fine-grained fibre concrete / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, T.A. Khezhev, Y.V. Pukharenko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1118. – P. 012020. – URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1118/1/012020>.

References

1. Alkaysi, M. Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC) / M. Alkaysi, S. El-Tawil, Z. Liu, W. Hansen // *Cement and Concrete Composites*. – 2016. – Vol. 66. – P. 47–56. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.005>.

2. Li, Y. Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete based on waste basalt powder for Sichuan-Tibet Railway / Y. Li, X. Zeng, J.L. Zhou, Y. Shi, H.A. Umar, G. Long, Y. Xie // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 312. – P. 127775. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127775>.
3. Arafa, M. Mechanical properties of ultra-high performance concrete produced in the Gaza strip Asian / M. Arafa, S. Shihada, M. Karmout // *Journal of Materials Science*. – 2010. – Vol. 2. – P. 1–12. – URL: <https://scialert.net/abstract/?doi=ajmskr.2010.1.12>.
4. Potasova, M.V. Prospective directions for the use of sugar production waste (rus) / M.V. Protasova, S.Yu. Mironov, O.V. Lukyanchikova, L.A. Babkina // *Auditorium*. – 2016. – No. 2(10). – P. 32–41.
5. Klyuev, A.V. Development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials / A.V. Klyuev, N.F. Kashapov, S.V. Klyuev, R.V. Lesovik, M.S. Ageeva, E.V. Fomina, N.A. Ayubov // *Construction Materials and Products*. – 2023. – 6 (1). – P. 60–73. – URL: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73>
6. Klyuev, A.V. Experimental studies of the processes of structure formation of composite mixtures with technogenic mechanoactivated silica component / A.V. Klyuev, N.F. Kashapov, S.V. Klyuev, S.V. Zolotareva, N.A. Shchekina, E.S. Shorstova, R.V. Lesovik, N.A. Ayubov // *Construction Materials and Products*. – 2023. – 6 (2). – P. 5–18. – URL: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18>
7. Loh, Y.R. Sugarcane bagasse — The future composite material: A literature review / Y.R. Loh, D. Sujana, M.E. Rahman, C.A. Das // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2013. – Vol. 75. – P. 14–22. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.002>.
8. Amin, M. Effect of ferrosilicon and silica fume on mechanical, durability, and microstructure characteristics of ultra high-performance concrete / M. Amin, A.M. Zeyad, B.A. Tayeh, Agwa I. Saad // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 320. – P. 126233. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126233>.
9. Gharieb, M. An initial study of using sugar-beet waste as a cementitious material / M. Gharieb, A.M. Rashad // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 250. – P. 118843. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118843>.
10. Thomas, B.S. Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: a comprehensive review / B.S. Thomas, J. Yang, K.H. Mo, J.A. Abdalla, R.A. Hawileh, E. Ariyachandra // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 40. – P. 102332. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102332>.
11. Klyuev, S., Wastes from the production of heat-insulating basalt wool as an additive in cement-based materials / S. Klyuev, A. Klyuev, E. Fomina, E. Shorstova, M. Ageeva, I. Nedoseko, L. Sabitov, V. Shamanov, R. Shayakhmetov, Y. Liseitsev // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 19. – P. 02347. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02347>.
12. Klyuev, S.V. Technogenic sands as effective filler for fine-grained fibre concrete / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, T.A. Khezhev, Y.V. Pukharensko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1118. – P. 012020. – URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1118/1/012020>.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624

DOI 10.54734/20722958_2025_3_87

*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

Шеин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Механика»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Быков Александр Николаевич,
аспирант кафедры «Механика»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Shein Aleksandr Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Mechanics»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Bykov Aleksandr Nikolaevich,
Postgraduate student of the Department
«Mechanics»

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

А.И. Шеин, А.Н. Быков

Дан краткий обзор научных исследований в области гашения колебаний зданий и сооружений за 2019-2024 гг., а также работ в области устройств гашения колебаний. Приведены результаты исследования российских и зарубежных ученых в рассматриваемой области. Описаны способы гашения динамических колебаний высотных сооружений.

Ключевые слова: здания и сооружения, гашение колебаний, демпфирующие устройства, сейсмические воздействия, сейсмостойкость

THE CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF DAMPING VIBRATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES

A.I. Shein, A.N. Bykov

The article provides a brief overview of scientific research in the field of vibration damping of buildings and structures in 2019-2024, and work in the field of vibration damping devices. The research of Russian and foreign scientists in this field is presented. The methods of damping dynamic fluctuations of high-rise structures are described.

Keywords: buildings and structures, vibration damping, damping devices, seismic effects, earthquake resistance

Введение. Вопрос противодействия сейсмическим и ветровым нагрузкам для защиты зданий от разрушений очень актуален. Поиск способов решения этой проблемы, нахождение новых методов гашения колебаний и противодействия динамическим нагрузкам, которые были бы экономически выгодны и легки в массовом применении, является темой ряда научных работ. Курильские острова и Сахалин, полуостров Камчатка, Северный Кавказ и побережье Чёрного моря, Забайкалье, Алтай и Тыва, Якутия – сейсмоопасные районы на территории России, т.е. районы, где периодически происходят землетрясения. Землетрясения характеризуются мощными колебаниями земной поверхности, что может повлечь серьезные разрушения зданий и сооружений.

Частота землетрясений во всем мире неуклонно растет. Поэтому вопрос противодействия сейсмическим и ветровым нагрузкам для защиты зданий от разрушений очень актуален. Поиск способов решения этой проблемы в части новых методов гашения колебаний и противодействия динамическим нагрузкам, которые были бы экономически выгодны и легки в массовом применении, является темой нижеприведенных научных работ.

Обзор. В статье [1] дана оценка сейсмостойкости железобетонного каркаса, заполненного сборными модульными блоками, и предложена новая концепция сейсмоусиления с использованием сборных модульных блочных стен (PMBW) для устранения недостатков традиционных методов сейсмоусиления железобетонных каркасов, заполненных поперечными стенами, каменными стенами и сборными панелями. Метод сейсмоусиления с использованием PMBW максимально использует преимущества заводских модульных блоков, повышая конструктивность и целостность соединений между существующим каркасом и заполняющими его PMBW. Для железобетонных зданий с незащищенными конструктивными элементами, в которых преобладают сдвиговые разрушения, применение этого метода сейсмоусиления обеспечивает достаточную прочность.

Aldo Milone в своих трудах предложил использовать крестообразные распорки (X-CBF) в качестве сейсмоусиления существующих стальных зданий, а также разработал процедуру пошагового проектирования усиления стального каркаса. Предложенная процедура применяется к существующему шестиэтажному стальному зданию, не соответствующему нормативным требованиям, которое находится в Неаполе (Италия). Для изучения эффективности предложенной процедуры проводился численный анализ. Полученные результаты показали, что можно снизить на 25 % сопротивление и жёсткость новых X-CBF, если укрепить соединения между балками и колоннами, чтобы они выдерживали прогиб соединённых балок. Сравнивается сейсмическая уязвимость построенных и модернизированных конструкций, а также количественно оценивается снижение сейсмического риска в соответствии с итальянскими рекомендациями по классификации рисков для конструкций. Оценивается изменение класса сейсмического риска в результате запланированных мероприятий, что подтверждает повышение сейсмостойкости для модернизированного здания.

Альтернативное решение по модернизации предложил Stefano Sorace, заключающееся во внедрении диссипативных распорок, оснащенных вязкостными демпферами под давлением. Для эквивалентных стоек генерируется трехлинейная кривая осевого усилия – смещения и преобразуется в кривую поперечного усилия-смещения панелей. Затем последняя сканируется с точки зрения последовательных пределов производительности и диапазонов. Эта модель применяется к реальному исследованию: к зданию с железобетонным каркасом, поврежденному землетрясением в Центральной Италии в 2016 году, хотя за несколько лет до этого были проведены работы по его модернизации. Эта технология была выбрана из-за ее высокой демпфирующей способности, а также из-за быстрой активации составляющих устройств на ранних стадиях сейсмической реакции здания. Анализ, проведённый в обновлённой конфигурации для основных сейсмических записей землетрясения 2016 года, подтверждает это свойство, демонстрируя незначительные повреждения лишь в небольшом количестве перегородок – вместо распространённых повреждений средней и тяжёлой степени, которые

были обнаружены в перегородках и заполнителях здания, — и безопасную реакцию всех конструктивных элементов.

В статье [2] приведен анализ самоцентрирующихся качающихся систем для сейсмостойких строительных конструкций. Представлен обзор исследований систем раскачивания для зданий из различных материалов, включая сталь, бетон, кирпич и дерево, а также проанализированы предыдущие исследования.

Катпин А. в своих работах дал краткий обзор устройств гашения колебаний, разобрал плюсовые и минусовые качества различных способов гашения колебаний упругих амортизаторов, виброгасителей ударного действия, демпферов вязкого трения, резино-металлических опор и т.п. В частности, по демпферам вязкого трения отмечено, что гидравлические демпферы в основном выполняются в виде поршневых и дроссельных. Основные их преимущества: хорошее демпфирование; линейная зависимость вязкого сопротивления от скорости колебаний. К недостаткам следует отнести: большой температурный коэффициент вязкости рабочей жидкости; возможные при больших нагрузках кавитационные разрывы жидкости, нарушающие гармонический характер колебаний.

Анализом исследований в области устройств гашения колебаний занимался также Hengyuan Zhang, отметив, что вязкоупругие демпферы (VED) привлекли к себе значительное внимание в последние десятилетия из-за их огромного потенциала в области контроля вибрации строительных конструкций. Однако из-за того, что температура и частота существенно влияют на характеристики VED, их широкое применение затруднено. Расширение температурного диапазона демпфирования матричных вязкоупругих демпфирующих материалов (VDMS) является ключом к расширению их применения. Развитие полимерных и наноматериалов открывает новые возможности для повышения демпфирующих характеристик VDMs. Более того, в расчетных моделях также следует учитывать различные влияющие факторы. Таким образом, в статье критически рассматриваются современные исследования в области технологий модификации VDMS. Кроме того, всесторонне обобщены линейные и нелинейные определяющие модели VDMS. Наконец, рассматриваются тенденции и направления развития VDMs и VEDs.

В статье [3] оценивается влияние ветра на сейсмоизолированное сверхвысотное здание на основе комплексного метода проектирования сейсмоизоляции. Согласно недавно опубликованному в Китае «Стандарту для сейсмоизоляции при проектировании зданий» (GB/T51408-2021), для проектирования сейсмоизоляции используется комплексный метод (ISIM), основанный на теории комплексного спектра реакции при наложении мод и комплексной полной квадратичной комбинации. ISIM и традиционные методы проектирования сейсмоизоляции сравниваются с точки зрения экономичности и безопасности. На основе действующих национальных норм предлагается подход к анализу воздействия ветра на сейсмоизолированные высотные здания. Устойчивость сейсмоизолирующего слоя к воздействию ветра рассматривается, когда периоды повторяемости ветровых нагрузок превышают 50-летнюю норму. Результаты исследования показывают, что ISIM значительно повышает сейсмостойкость сейсмоизолированных зданий, кроме того, этот метод экономичен. Проблема дискомфорта при ветровых колебаниях наблюдается на верхних этажах сейсмоизолированных высотных зданий, где сложнее обеспечить комфорт при ветровой нагрузке с периодом повторяемости 1 год по сравнению с ветровыми нагрузками с периодами повторяемости 5 и 10 лет соответственно. При проектировании сейсмоизолированных высотных зданий в будущем необходимо учитывать возможные неблагоприятные последствия кумулятивной остаточной деформации, вызванной ветром, для сейсмоизоляции.

Younes Achaoûi в статье [4] указал, что заглублённые в почву конструкции (фундаменты, подземные уровни зданий и т.д.) в ближайшем будущем смогут напрямую воздействовать на само сейсмическое возмущение, действующее в основании зданий. С помощью численных моделей демонстрируется эффект от заглублённого устройства, состоящего из резонирующих железных сфер. Эта способность устройства

фильтровать частоты открывает широкие возможности для применения в области взаимодействия грунта и конструкции (ISS), особенно если фундаменты спроектированы как для обеспечения несущей способности, так и в качестве локальных резонансных элементов. Фундаментами с точки зрения сейсмической защиты зданий занимался также О. Касабланка, в своей работе он исследовал периодические фундаментные сваи для сейсмической защиты сооружений. Эта система фильтрует сдвиговые волны в деформируемом грунте в определенном диапазоне частот. Периодическая свая-фундамент состоит из массива вертикальных периодических структурных элементов, содержащих внутренние резонаторы, настроенные на одну или несколько собственных частот грунтового отложения. Предложенная система эквивалентна прерывистой свае-фундаменту и может быть установлена в грунте примерно так же, как и сваи, что делает её пригодной для применения в существующих конструкциях.

В работе [5] рассмотрен анализ демпфирования высотных зданий с аутригерами и демпферами с инерцией и отрицательной жёсткостью с учётом взаимодействия грунта и конструкции. Установлено единое характеристическое уравнение для различных грунтовых условий и выносных систем. Решая унифицированное характеристическое уравнение, можно параметрически исследовать многомодовый эффект демпфирования для оценки влияния SSI на высотные здания при установке обычных аутригеров (CO), обычных аутригеров с демпфированием (CDO), аутригеров с демпфированием отрицательной жёсткости (NSDO) и аутригеров с инерционным демпфированием (IDO). Затем оцениваются виброхарактеристики демпфированных систем аутригеров с учётом SSI при ветровых и сейсмических нагрузках. Выделяются два ключевых момента: (i) взаимодействие между качанием грунта и вращением выносных опор в высотных зданиях; (ii) влияние изменения частоты, вызванного SSI, на IDO и NSDO с частотно-зависимыми / независимыми характеристиками.

Морские сооружения являются критически важной инфраструктурой в области океанического строительства, которая может подвергаться угрозе землетрясений, особенно если она расположена в зоне повышенного риска. В статье [6] рассматривается система демпфирования на основе инерционных масс для контроля вибрации морских платформ, подверженных воздействию колебаний грунта, рекомендуется использовать инерционную демпфирующую систему изоляции (IDIS) для сейсмической защиты морских платформ. Концепция IDIS впервые разработана путём объединения обычных подшипников с инерционными демпферами (ID). Создана аналитическая модель системы и выведены соответствующие уравнения движения.

Susmita Panda представил стратегию контроля вибрации мостов, которая включает в себя внедрение инерционного усилителя для снижения вибрации, вызываемой поездом. В исследовании всесторонне оценивается эффективность двух типов вибропоглотителей, а именно пружинно-массового резонатора (SMR) и инерционных усилителей (IA), с использованием безразмерной структуры, основанной на механике. В дальнейшем в исследовании применялся адаптивный генетический алгоритм эвристического поиска (GA) для определения оптимальных конструктивных параметров предлагаемых вибропоглотителей.

Демпфированием мостов занимался также Lin Chen. В своих работах он рассматривал снижение вибрации большепролетных мостов с демпфирующими опорами. В этом исследовании предлагается новая концепция дополнительного демпфирования таких мостов для смягчения колебаний за счет демпфирования вращений балки моста во время вертикальных и крутильных колебаний вместо поступательных перемещений, которые ранее были в центре внимания соответствующих исследований. Важным преимуществом этой концепции является то, что во время колебаний повороты мостовой балки вблизи её концов относительно велики, что обеспечивает достаточное дополнительное демпфирование, а также удобство в использовании. Концепция реализуется с помощью демпфирующего аутригера, состоящего из жёсткой части, соединённой с мостовой балкой, и горизонтальных демпферов, соединяющих конец аутригера с опорой моста или пилонной опорой.

Проблему демпфирования мостов исследовала и О. Паддаева. Она провела ряд экспериментов для оценки динамического поведения моста в ветреную погоду при различных уровнях демпфирования. Работа посвящена анализу и оценке результатов исследований в области влияния демпфирующей способности материалов на динамическое поведение мостовых конструкций для их дальнейшего использования как в самих мостовых конструкциях и материалах, из которых они изготовлены, в чистом виде, так и, в том числе, для интеграции в другие конструкции.

Zoccolini L. в научных трудах рассмотрел жидкостные вязкоупругие демпферы для сейсмической защиты мостов. Жидкостные вязкостные демпферы (FVD) — это специальные устройства, которые рассеивают энергию за счёт ламинарного течения вязкой жидкости, проходящей через отверстие или клапанную систему под действием поршня.

В статье [7] для высотных зданий, подверженных сейсмическому воздействию, была предложена система нейтрализации колебаний, описан принцип её работы и оценены преимущества. Составлена математическая модель движения несущих и несиловых конструкций. Рассмотрены системы защиты от низкочастотных колебаний под воздействием внешнего гармонического воздействия. Определены оптимальные параметры настройки роликового демпфера в структуре системы компенсации.

Свой вариант виброгасителя для высотных зданий предложил Zhenfeng Lai. Выполнены численное моделирование и экспериментальная проверка гибридного демпфера с квадратичным затуханием скорости для контроля вибрации высотных зданий. Гибридные массовые демпферы (ГМД), которые сочетают в себе настраиваемые массовые демпферы с активными массовыми демпферами (АМД), установленными сверху, используются для контроля вибрации в высотных зданиях. Однако при различных нагрузках ход и сила управления ГМД могут превышать их расчётные пределы, что потенциально снижает эффективность управления. Типично ограниченное внутреннее пространство высотных конструкций ещё больше усугубляет эту проблему. Для её решения предлагается HMD с демпфированием, зависящим от квадрата скорости (VSD-HMD), который сочетает в себе устройство демпфирования от квадрата скорости (VSDD) с АМД. Создана численная модель башни Canton Tower, управляемой VSD-HMD, и представлено оптимальное соотношение между силой и скоростью VSDD.

В статье [8] представлена оценка сейсмических повреждений склеенных и не склеенных многослойных резиновых опор. Рассмотрены опорные плиты из ламинированной резины (LRB), широко используемые в автомобильных мостах по всему миру, подверженные разрушению при сдвиге, сжатию или смещению во время сейсмических событий, что может поставить под угрозу безопасность моста. Исследования, проведённые после землетрясений в Вэньчуане в 2008 году, Нортридже в 1994 году и Чи-Чи на Тайване в 1999 году, показали, что опорные плиты действуют как «предохранительный элемент» во время сейсмических событий, что приводит к значительному снижению степени повреждения мостов.

В статье [9] дана оценка демпфирования восьмиэтажного стального здания с нелинейным масляным демпфером при сильных землетрясениях. Предложен и исследован тип нелинейного масляного демпфера с вязкоупругими полимерными мягкими уплотнениями. В статье «Вязкостный демпфер с регулируемым демпфированием для управления зданиями при ветровой нагрузке» Ли Мао предложил новый пассивный вязкостный демпфер с переменным коэффициентом демпфирования, зависящим от скорости. Разработал численную модель вязкостного демпфера с переменным демпфированием, выполнил структурный анализ высотного здания с вязкостным гасителем колебаний переменной степени демпфирования, подвергнутого ветровой нагрузке. Высотные здания подвержены низкочастотным колебаниям, вызванным ветровой нагрузкой, и традиционный вязкостный демпфер с постоянным коэффициентом затухания (CDVD) не справляется с эффективным подавлением колебаний высотных зданий при ветровых нагрузках из-за постоянного коэффициента затухания. Для решения этой проблемы был разработан и изготовлен новый вязкостный демпфер с

переменным коэффициентом затухания (VDVD). Для оценки характеристик переменного затухания при различных скоростях были проведены испытания. В работе Khalil Yahya «Обзор устройств для рассеивания пассивной энергии и методов их монтажа в конструкциях высотных зданий» были описаны следующие виды дополнительных демпфирующих устройств: фрикционные демпфирующие устройства (FDD), металлические демпфирующие устройства (MDD), вязкоупругие устройства (VED) и устройства для работы с вязкой жидкостью (VFD). Несмотря на то что доступны различные механизмы установки устройств, в этой статье описываются стандартная методика установки, т.е. метод Лавана Такеваки (LTt), и простой алгоритм последовательного поиска (SSSA).

Лю Вэй в статье [10] предлагает сейсмический контроль конструкций, изолированных от основания, с использованием не зависящих от скорости демпфирующих устройств: модели инерционно-вязкого демпфера с отрицательной жёсткостью Максвелла – Вейхерта (IvNsMW) и модели инерционно-вязкого демпфера RILD. Эти модели различаются по способу соединения инерционного и вязкостного демпферов. Представлен метод прямого расчёта для определения коэффициентов этих двух устройств. Эффективность предложенных устройств на основе RILD для сейсмоизоляции низкочастотных конструкций была изучена на примере многоэтажного здания с изолированным фундаментом. Результаты показывают, что предложенные устройства на основе RILD являются перспективными инструментами для контроля смещения и ускорения низкочастотных конструкций.

В статье [11] рассмотрено моделирование динамического поведения стержней, выполненных из полимеркомпозитных материалов. В качестве модели внутреннего трения материала используется модель нелокального демпфирования. Колебательный процесс рассматривается на примере стержня, жёстко защемлённого по концам. Уравнение движения стержня, построенное с учётом нелокального демпфирования, решается методом Бубнова – Галёркина. Определяется количество форм собственных колебаний, учёт которых необходим для достижения требуемой точности расчёта. Процесс калибровки модели нелокального демпфирования заключается в определении её параметров на основании данных численного эксперимента. В качестве численного эксперимента использовались результаты трёхмерного конечно-элементного моделирования колебаний стержня, выполненного из термореактивного винилэфирного стеклопластика, нагруженного мгновенно приложенной равномерно распределённой нагрузкой. Модель стержня была построена в расчётном комплексе с учётом ортотропных свойств композитного материала.

В [12] рассмотрен процесс вибрационного гашения колебаний сосредоточенного тела посредством динамического ударного виброгасителя, содержащего систему последовательных ударных пар, в которых соударяющиеся элементы представляют собой магниты. Обосновано влияние выбора проектируемых параметров виброгасителя на колебания тела. Описаны особенности настройки системы в режим широкой полосы виброгашения. В своих работах Kai Yang представил метод вязкостного демпфирования с использованием рамных домкратов для эффективного снижения сейсмической реакции диспетчерских вышек аэропортов. Предложен новый подход, определяемый как вязкостный демпфер с рамным домкратом (FJ-EVD). Разработана механическая модель с заданными свойствами усиления деформации FJ-EVD, после чего была построена конструкция башенного типа, оснащенная FJ-EVD. Для изучения преимуществ снижения вибрации при сейсмических воздействиях, характеризующихся различными частотными составляющими, был проведен нелинейный анализ во временной области и параметрическое исследование.

В [13] представлена оригинальная стратегия проектирования для снижения сейсмических воздействий в современных конструкциях за счет использования гидровязких демпферов (FVD) и вязкостных стеновых демпферов (VWD). Задача оптимизации сформулирована таким образом, чтобы минимизировать скалярную сумму трех составляющих: количества амортизаторов, общего коэффициента смещения между этажами и абсолютного ускорения от пола. Конструктивные

параметры определяют типы амортизаторов и их расположение в конструкции. Для эффективного решения этой задачи оптимизации был внедрен и применен алгоритм расширенного поиска симбиотических организмов (ExSOS), включающий изменения на трех этапах. Численные примеры сделаны на полномасштабных моделях 10-этажных зданий. Полученные результаты подчеркивают важность точной настройки распределения и количества демпферов для достижения оптимальных сейсмических характеристик, что указывает на потенциальную применимость к более крупным или сложным сооружениям.

Owji H.R. в своих работах констатирует, что снижение вибраций конструкции является одной из основных задач при управлении конструкцией. Для этой цели предлагаются различные методы управления. Отмечено, что полуактивные методы являются очень привлекательными и выгодными, поскольку они требуют минимального количества энергии, но при этом способны значительно уменьшить смещения конструкции. В статье поведение конструкции, оснащенной новым типом полуактивного настраиваемого демпфера массы, называемого SADA-TMD, сравнивается с поведением конструкции, оснащенной активным настраиваемым демпфером массы (ATMD). SADA-TMD – это TMD, оснащенный полуактивным демпферным приводом (SADA). Это устройство может поглощать энергию, передаваемую на обычный TMD во время землетрясений, и использовать его в качестве привода; оно также может гасить любую часть этой поглощенной энергии. Для сравнения было проведено численное моделирование многоэтажного здания. Производительность SADA-TMD и ATMD управляется контроллером с нечеткой логикой (FLC). Преимущества использования SADA-TMD для уменьшения структурных реакций показаны на иллюстрациях и численных результатах. Однако результаты, полученные при применении SADA-TMD, можно сравнить с результатами использования активных демпферов массы (ATMD), поскольку SADA-TMD является полуактивным устройством, потребляемая мощность которого значительно ниже, чем у ATMD. Следует отметить, что, поскольку SADA-TMD может работать от аккумулятора, он более надежен, чем ATMD, во время сильных землетрясений, поскольку источник энергии, необходимый для активного привода, может выйти из строя во время этих землетрясений.

В статье [14] авторы предприняли попытку найти общий подход к сейсмостойкости на базе динамики и стратегий управления сейсмостойкими конструкциями, уделив особое внимание влиянию возмущений с нелинейными эффектами. Сначала описывается фундаментальная структурная динамика с управляющими силами при сейсмическом возбуждении. Затем, в качестве базовой стратегии управления конструкциями, рассматриваются эффекты линейных законов управления с обратной связью. Далее вводится наименьший квадратичный регулятор (LQR), учитывающий влияние возбуждения, управление с наименьшей потребляемой энергией и LQR на короткий промежуток времени при заданной информации о возбуждении, разъясняются роли FB, мгновенной контрреакции и прямой связи (FF). Кроме того, делается вывод о том, что трудно однозначно решить задачи оптимизации с учетом ограничения усилия управления, и уравнения Эйлера для оптимального управления становятся нелинейными. Также показано, что можно построить расширенный закон управления FB, используя модель уравнения состояния для информации о возбуждении. В этом случае ожидается не только дополнительный эффект демпфирования, но и диссонансный эффект при сейсмическом возбуждении. Кроме того, вводятся достаточные условия устойчивости для нелинейных законов управления.

В [15] рассмотрена работа ленточно-тросового гасителя колебаний с гидроцилиндром одностороннего действия. Также в трудах автора представлен анализ работы реактивных гасителей при сейсмических нагрузках, при этом для решения исходных систем уравнений движения применялись прямые шаговые методы. Приведен вывод соотношений МКЭ для композитного стержня с пластическими накладками и иллюстрации гашения колебаний плоских и пространственных стальных стержневых систем с этими демпфирующими устройствами. При этом практическая

борьба с развитием колебаний осуществлялась с помощью алюминиевых полосовых накладок – генераторов моментов сопротивления движению для гашения и низкочастотных, и высокочастотных колебаний. Показано, что данная система гашения работает на всем спектре колебаний.

Выводы. В последние годы формируется направление гашения колебаний в виде применения энергопоглощающих материалов и устройств. Это и применение полимеркомпозитных материалов, и использование сплавов с памятью формы, многослойных пластин из металлического волокна с демпфирующими слоями.

Развитие полимерных и наноматериалов открывает новые возможности для повышения демпфирующих характеристик вязкоупругих демпферов. Перспективным видится развитие реактивного способа активного гашения колебаний.

Полноценное решение проблемы сохранности зданий и сооружений может быть достигнуто за счет обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений на этапе проектирования, а также неукоснительного выполнения требований к качеству работ при практической настройке систем демпфирования.

Анализ научных исследований в области демпфирования сейсмических колебаний свидетельствует о значительных усилиях, направленных на защиту зданий и сооружений от динамических нагрузок. Однако по-прежнему остается недостаточно изученным ряд аспектов этой проблемы.

Список литературы

1. Ju-Seong, Jung. Seismic capacity evaluation of a reinforced concrete frame infilled with precast modular block wall for enhancing the horizontal load / Ju-Seong Jung, Chul-Seung Kwak, Woo-Young Lim, Kang-Seok Lee // *Journal of Building Engineering*. – 15 November 2024. – Vol. 97. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224025294>
2. Mohammad, Froozanfar. Review of self-centering rocking systems for earthquake-resistant building structures: State of the art / Mohammad Froozanfar, Saber Moradi, Reza Kianoush, Matthew S. Speicher, Luigi Di Sarno // *Journal of Building Engineering*. – 1 May 2024. – Vol. 84. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400175X>
3. Jiajun, Tan. Evaluation of wind-induced effect on seismically isolated super high-rise building based on integrated seismic isolation design method: A case study / Jiajun Tan, Ping Tan, Jiurong Wu, Demin Feng // *Journal of Building Engineering*. – 1 October 2023. – Vol. 76. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223014559>
4. Younes, Achaoui., Seismic waves damping with arrays of inertial resonators / Younes Achaoui, Bogdan Ungureanu, Stefan Enoch, Stéphane Brûlé, Sébastien Guenneau // *Extreme Mechanics Letters*. – September 2016. – Vol. 8. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352431616300281>
5. Meng, Wang. Damping dissipation analysis of damped outrigger tall buildings with inerter and negative stiffness considering soil-structure-interaction / Meng Wang, Chao Liu, Mi Zhao, Fei-Fei Sun, Satish Nagarajaiah, Xiu-Li Du // *Journal of Building Engineering*. – 1 July 2024. – Vol. 88. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224007939>
6. Ruisheng, Ma. Inerter-based damping isolation system for vibration control of offshore platforms subjected to ground motions/ Ruisheng Ma, Kaiming Bi, Haoran Zuo, Xiuli Du // *Ocean Engineering*. – 15 July 2023. – Vol. 280. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823011101>
7. Burtseva, O.A. Roller Seismic Impact Oscillation Neutralization System for High-rise Buildings / O.A. Burtseva, A.N. Tkachev, S.A. Chipko // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039302?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8d74c92eac29e313

8. Bingzhe, Zhang. Seismic damage assessment of bonded versus unbonded laminated rubber bearings: A deep learning perspective / Bingzhe Zhang, Guanya Lu, Cancan Yang, Mingsai Xu, Kehai Wang // *Engineering Structures*. – 15 December 2024. – Vol. 321. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014102962401558X>
9. Yunjia, Tong. Damping evaluation of an eight-story steel building with nonlinear oil damper under strong earthquakes / Yunjia Tong, Songtao Xue, Liyu Xie, Hesheng Tang // *Journal of Building Engineering*. – 15 May 2023. – Vol. 67. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223001833>
10. Wei, Liu. Seismic control of base-isolated structures using rate-independent damping devices / Wei Liu, Yi-Qing Ni, Kohju Ikago, Wai Kei Ao // *Journal of Building Engineering*. – 1 November 2023. – Vol. 78. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223019241>
11. Шепитько, Е.С. Калибровка модели нелокального демпфирования материала с использованием данных численного эксперимента / Е.С. Шепитько. – DOI:10.15862/16SATS319A // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2019. – №3. – URL: <https://t-s.today/PDF/16SATS319.pdf> (доступ свободный). – Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
12. Замурагин, Ю. М. Гашение колебаний посредством системы с большим числом свободных соударяющихся магнитных элементов / Ю.М. Замурагин, А.М. Гуськов, В.Л. Крупенин. – DOI: 10.18411/vntr2019-146-3 // *Bulletin of Science and Technical Development*. – 2019. – № 10 (146). – 16. – URL: www.vntr.ru.
13. Vin, Nguyen-Thai. An effective optimum design for passive viscous damping control using FVDs/VWDs in multi-story buildings // Vin Nguyen-Thai, Duy-Khuong Ly, T. Nguyen-Thoi // *Structures*. – September, 2024.
14. Kazuhiko, Yamada. Fundamental dynamics and control strategies for aseismic structural control/ Kazuhiko Yamada, Takuji Kobori// *International Journal of Solids and Structures*. – August 2001.
15. Шеин А.И. Три новых способа гашения колебаний зданий и сооружений / А.И. Шеин, А.В. Чуманов, М.Б. Зайцев // *Региональная архитектура и строительство*. – 2024. – № 3 (60). – С. 81–89.

References

1. Ju-Seong, Jung. Seismic capacity evaluation of a reinforced concrete frame infilled with precast modular block wall for enhancing the horizontal load / Ju-Seong Jung, Chul-Seung Kwak, Woo-Young Lim, Kang-Seok Lee // *Journal of Building Engineering*. – 15 November 2024. – Vol. 97. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224025294>
2. Mohammad, Froozanfar. Review of self-centering rocking systems for earthquake-resistant building structures: State of the art / Mohammad Froozanfar, Saber Moradi, Reza Kianoush, Matthew S. Speicher, Luigi Di Sarno // *Journal of Building Engineering*. – 1 May 2024. – Vol. 84. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400175X>
3. Jiajun, Tan. Evaluation of wind-induced effect on seismically isolated super high-rise building based on integrated seismic isolation design method: A case study / Jiajun Tan, Ping Tan, Jiurong Wu, Demin Feng // *Journal of Building Engineering*. – 1 October 2023. – Vol. 76. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223014559>
4. Younes, Achaoui., Seismic waves damping with arrays of inertial resonators / Younes Achaoui, Bogdan Ungureanu, Stefan Enoch, Stéphane Brûlé, Sébastien Guenneau // *Extreme Mechanics Letters*. – September 2016. – Vol. 8. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352431616300281>
5. Meng, Wang. Damping dissipation analysis of damped outrigger tall buildings with inerter and negative stiffness considering soil-structure-interaction / Meng Wang, Chao Liu, Mi Zhao, Fei- Fei Sun, Satish Nagarajaiah, Xiu-Li Du // *Journal of Building Engineering*. –

1 July 2024. – Vol. 88. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224007939>

6. Ruisheng, Ma. Inerter-based damping isolation system for vibration control of offshore platforms subjected to ground motions/ Ruisheng Ma, Kaiming Bi, Haoran Zuo, Xiuli Du // *Ocean Engineering*. – 15 July 2023. – Vol. 280. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823011101>

7. Burtseva, O.A. Roller Seismic Impact Oscillation Neutralization System for High-rise Buildings / O.A. Burtseva, A.N. Tkachev, S.A. Chipko // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039302?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8d74c92eac29e313

8. Bingzhe, Zhang. Seismic damage assessment of bonded versus unbonded laminated rubber bearings: A deep learning perspective / Bingzhe Zhang, Guanya Lu, Cancan Yang, Mingsai Xu, Kehai Wang // *Engineering Structures*. – 15 December 2024. – Vol. 321. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014102962401558X>

9. Yunjia, Tong. Damping evaluation of an eight-story steel building with nonlinear oil damper under strong earthquakes / Yunjia Tong, Songtao Xue, Liyu Xie, Hesheng Tang // *Journal of Building Engineering*. – 15 May 2023. – Vol. 67. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223001833>

10. Wei, Liu. Seismic control of base-isolated structures using rate-independent damping devices / Wei Liu, Yi-Qing Ni, Kohju Ikago, Wai Kei Ao // *Journal of Building Engineering*. – 1 November 2023. – Vol. 78. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223019241>

11. Shepitko, E.S. Calibration of a model of non-local damping of a material using numerical experimental data / E.S. Shepitko. – DOI: 10.15862/16SATS319A // Online magazine «Transport facilities». – 2019. – No. 3. – URL: <https://t-s.today/PDF/16SATS319.pdf> (access is free). – Cover from the screen. Russian, English.

12. Zamuragin, Yu.M. Vibration damping by means of a system with a large number of free colliding magnetic elements / Yu.M. Zamuragin, A.M. Guskov, V.L. Krupenin. – DOI: 10.18411/vntr2019-146-3 // *Bulletin of Science and Technical Development*. – 2019. – No. 10 (146). – 16. – URL: www.vntr.ru.

13. Vin, Nguyen-Thai. An effective optimum design for passive viscous damping control using FVDs/VWDs in multi-story buildings / Vin Nguyen-Thai, Duy-Khuong Ly, T. Nguyen-Thoi // *Structures*. – September 2024.

14. Kazuhiko, Yamada. Fundamental dynamics and control strategies for aseismic structural control / Kazuhiko Yamada, Takuji Kobori // *International Journal of Solids and Structures*. – August 2001.

15. Shein, A.I. Three new ways of damping vibrations of buildings and structures / A.I. Shein, A.V. Chumanov, M.B. Zaitsev // *Regional architecture and engineering*. – 2024. – No. 3 (60). – P. 81–89.

УДК 624.014.2: 624.073

DOI 10.54734/20722958_2025_3_97

*Балтийский федеральный университет
имени Иммануила Канта*Россия, 236016, г. Калининград,
ул. А. Невского, д. 14,
тел.: 8(4012) 59-55-95**Корягин Сергей Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
профессор образовательно-научного
кластера «Институт высоких технологий»
E-mail: skoryagin@kantiana.ru.**Шарков Олег Васильевич,**
доктор технических наук, доцент,
профессор образовательно-научного
кластера «Институт высоких технологий»
E-mail: osharkov@kantiana.ru.**Великанов Николай Леонидович,**
доктор технических наук, профессор,
профессор образовательно-научного
кластера «Институт высоких технологий»
E-mail: nvelikanov@kantiana.ru*Immanuel Kant Baltic Federal University*Russia, 236016, Kaliningrad, 14,
A. Nevskogo St.
tel.: 8(4012) 59-55-95**Koryagin Sergey Ivanovich,**
Doctor of Sciences, Professor, Professor of the
High Technologies Institute
E-mail: skoryagin@kantiana.ru**Sharkov Oleg Vasil'yevich,**
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Professor of the High Technologies Institute
E-mail: osharkov@kantiana.ru).**Velikanov Nikolay Leonidovich,**
Doctor of Sciences, Professor, Professor of the
High Technologies Institute
E-mail: nvelikanov@kantiana.ru

ПРИМЕНЕНИЕ НАКЛАДНЫХ ЛИСТОВ НА ЗАКЛЕПКАХ ПРИ РЕМОНТЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С.И. Корягин, О.В. Шарков, Н.Л. Великанов

Износ является одним из основных повреждающих факторов, влияющих на несущую способность металлических листовых конструкций в строительстве. Представлены описание образцов и результаты модельного эксперимента по исследованию прочностных характеристик листовых конструкций, несущая способность которых восстановлена с применением накладных листов, клеевого и заклепочного соединений. Полученные результаты позволяют проводить эмпирическую оценку параметров взаимодействия основного и накладного листов, что способствует совершенствованию технологий их применения при ремонте строительных конструкций. Проведена оценка влияния способа зачистки поверхности склеиваемых листов на параметры клеевого соединения.

Ключевые слова: металлическая конструкция, клеевая композиция, напряженное состояние, изгиб, растяжение

APPLICATION OF OVERLAY PLATES ON RIVETS IN REPAIR OF BUILDING STRUCTURES

S.I. Koryagin, O.V. Sharkov, N.L. Velikanov

Wear is one of the main damaging factors affecting the load-bearing capacity of metal plate structures in construction. A description of samples and the results of a model experiment to study the strength characteristics of plate structures, the load-bearing capacity of which has been restored using overlay plates, adhesive and riveted joints, is presented. The results obtained make it possible to carry out an empirical assessment of the parameters of interaction between the base and overlay plates, which contributes to the improvement of technologies for their use in the repair of building structures. The influence of the method of stripping the surface of the glued sheets on the parameters of the adhesive joint has been evaluated.

Keywords: metal structure, adhesive composition, stress state, bending, tension

Введение

Металлические листовые конструкции находят широкое применение в различных строительных объектах – резервуарах и бункерах, промышленных газовоздухопроводах, колоннах и горизонтальных аппаратах химической и нефтеперерабатывающей промышленности и др. [1–4]. По некоторым оценкам, их вес может составлять до 30...35 % от общего веса всех металлоконструкций [5].

Одним из основных повреждающих факторов, снижающих несущую способность строительных металлических конструкций и зачастую вызывающих преждевременный вывод объектов из эксплуатации в целом, является коррозия [6–8]. Это приводит к значительным потерям и затратам трудовых и материальных ресурсов.

Для восстановления несущей способности и защиты от коррозии листовых металлических конструкций можно использовать метод совместного применения накладных листов [9] и полимерных покрытий в виде клеевой композиции [10–11].

Такой метод осуществляется путем зачистки изношенного участка основного листа, нанесения клеевой композиции, подгонки по месту и установки накладных листов. Накладной лист может крепиться за счет как клеевой композиции [12, 13], так и дополнительной установки заклепок [3, 12, 14]. Клеевая композиция выполняет функции как защитного покрытия от коррозии, так и крепления накладного листа. В этом случае фактически создается композиционный элемент.

Перед креплением накладного листа изношенную поверхность строительной конструкции надо зачистить. При восстановлении детали с дефектом покрытия, одним из вариантов является удаление слоя краски, чтобы можно было нанести новый слой или восстановить первоначальное состояние детали. Далее проводится обработка поверхности различными методами. Например, пескоструйная, дробеструйная, шлифование, грунтование и другие виды обработки поверхности.

Разрушение клеевых соединений обычно начинается с микродефектов, расположенных на поверхности металлической основы. На основании вышеизложенного можно полагать, что методы обработки поверхности основного листа могут оказать существенное влияние на разрушение клеевых соединений в механическом аспекте.

При этом происходит изменение расчетной схемы строительной конструкции. Представляет практический интерес определение влияния накладного листа и способа его крепления на напряженное состояние основного листа (элемента строительной конструкции).

Материалы и методика проведения исследований

Испытываемые образцы представляли собой композитные элементы, состоящие из основного и накладного металлических листов, связанных клеевой композицией (рис. 1).

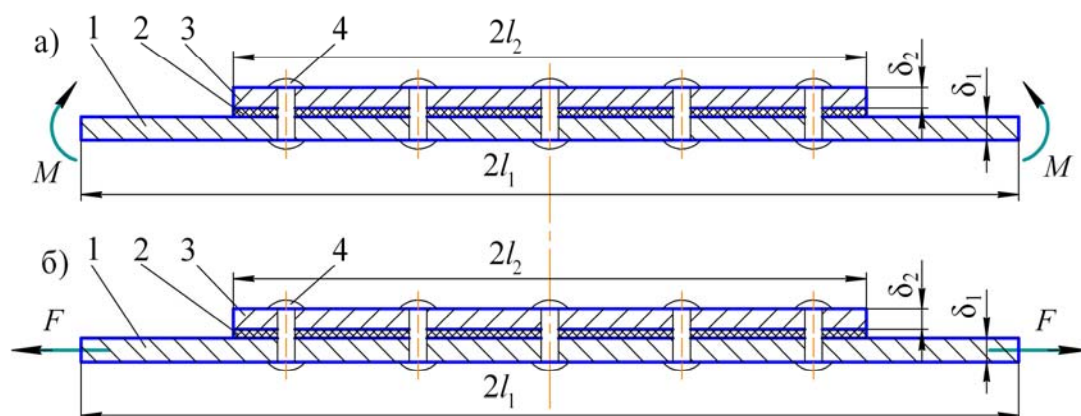


Рис. 1. Схема проведения испытаний при изгибе (а) и растяжении (б):

1 – основной лист; 2 – клеевая композиция; 3 – накладной лист; 4 – заклепка

Материал основного и накладного листов – сталь Ст 3, длина и толщина листов соответственно $2l_1=450$ мм, $\delta_1=5$ мм и $2l_2=250$ мм, $\delta_2=3$ мм. Соединение листов

осуществлялось с помощью клеевой композиции типа «Спрут-9М». Ширина композитного элемента $b = 85$ мм.

Испытания проводили с учетом рекомендаций ГОСТ Р 56810-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов» и ГОСТ Р 56785-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов».

В ходе эксперимента основной лист нагружали изгибающим моментом M и растягивающей нагрузкой F и определяли нормальные напряжения, возникающие на верхних и нижних волокнах по оси симметрии основного листа и методом тензометрии [15]. Величины изгибающего момента и растягивающей нагрузки принимали из условия возникновения нормальных напряжений в основном листе не более 25 % от предела текучести материала.

Результаты и обсуждение

Для описания характера распределения нормальных напряжений в основном листе введем понятия относительного напряжения и относительной координаты, которые соответственно определяются как:

$$\sigma^* = \frac{\sigma_{li}}{\sigma_1}, \quad l^* = \frac{l_{li}}{l_2},$$

где σ_1 – напряжение в основном листе без полимерного покрытия; σ_{li} – замеренное напряжение в точке испытываемого образца; l_{li} – текущая координата точки на основном листе.

Характер распределения напряжений по длине основного листа на участке крепления накладного листа в случае изгиба и растяжения удобно проследить на графиках (рис. 2), построенных в безразмерном виде. Экспериментальные результаты показаны для участков l_1 и l_2 , соответствующих половине испытываемого образца. Для второй половины результаты выглядят симметрично.

Как видно из рис. 2, накладной лист хорошо втягивается в работу при двух вариантах его крепления. При этом напряжения в основном листе существенно снижаются. Применение заклепок позволяет уменьшить величины напряжений в среднем на 19...24 % по сравнению с вариантом крепления накладного листа без заклепок, так как при нагружении они работают на срез.

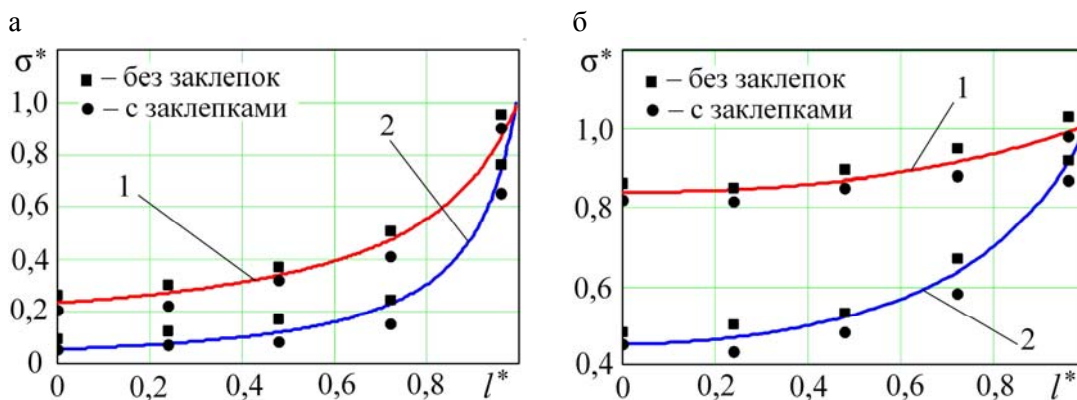


Рис. 2. Влияние изгибающего момента (а) и растягивающей нагрузки (б) на изменение нормальных напряжений:
1 – нижняя кромка; 2 – верхняя кромка

Аппроксимация экспериментальных данных позволила получить эмпирическую зависимость для оценки напряженного состояния основного листа в виде

$$\sigma_{li^*} = \frac{K_{\sigma} \sigma_1}{a_0 + a_1 l^* + a_2 (l^*)^2}, \quad (1)$$

где a_0 , a_1 , a_2 – аппроксимирующие коэффициенты (см. таблицу); K_σ – эмпирический коэффициент, $K_\sigma=0,9\ldots 1,1$.

В зависимости (1) меньшие величины коэффициента K_σ принимают для варианта с заклепочным соединением, большее – без заклепочного.

Аппроксимационные коэффициенты при растяжении и изгибе

Тип нагружения	Верхняя кромка			Нижняя кромка		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
Растяжение	4,38	-2,51	-0,887	20	-27,98	9,0
Изгиб	1,19	$2,73 \cdot 10^{-2}$	-0,225	2,23	$-8,41 \cdot 10^{-2}$	-1,148

Выводы

Проведенный модельный эксперимент позволил определить характер распределения нормальных напряжений в основном листе строительной конструкции, на которой с помощью клеевого и заклепочного соединений закреплён накладной лист.

Показано, что применение накладных листов может уменьшать напряжения в основном листе при изгибе в 4,16...16,6 раза и при растяжении – 1,16...2,22.

Полученные результаты могут быть востребованы для создания технологий неразъемного соединения листовых элементов после оценки показателей их эксплуатации.

Список литературы

1. Ведяков, И.И. Современные отечественные стандарты и вопросы расширения применения металлических конструкций в строительстве / И.И. Ведяков, П.Д. Одесский // Вестник НИЦ Строительство. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 42–53.
2. Енджиевский, Л.В. Ограждающие и несущие строительные конструкции из стальных тонкостенных профилей / Л.В. Енджиевский, И.И. Крылов, А.Н. Кретинин, А.В. Терешкова. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2010. – 282 с.
3. Металлические конструкции. Справочник проектировщика / под ред. Н.П. Мельникова. – Москва : Стройиздат, 1980. – 776 с.
4. Du, Y. Seismic performance of a repaired thin steel plate shear wall structure / Y. Du, J. Hao, J. Yu, H. Yu, B. Deng, D. Lv, Z. Liang. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.09.020 // Journal of Constructional Steel Research. – 2018. – Vol. 151. – P. 194–203.
5. Лессиг, Е.Н. Листовые металлические конструкции / Е.Н. Лессиг, А.Ф. Лилеев, А.Г. Соколов. – Москва : Стройиздат, 1970. – 489 с.
6. Королев, В.П. Параметризация требований коррозионной защищенности стальных конструкций / В.П. Королев, И.В. Кущенко, Е.А. Бочарова. – DOI 10.33979/2073-7416-2023-108-4-33-46 // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 4(108). – С. 33–46.
7. Семенова, И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семенова, Г.М. Флоринич, А.В. Хорошилов. – Москва : Физматлит, 2010. – 416 с.
8. Moron, C. Corrosion of supporting steel constructions: a need in the architecture and degree in edification study plans / C. Moron, D. Ferrandez, A. Moron, P. Saiz. – DOI: 10.21125/inted.2019.1742 // 13th International Technology, Education and Development Conference (INTED2019), 11-13 March, 2019, Valencia, Spain. Proceedings. – P. 7191–7196.
9. Великанов, Н.Л. Расчет параметров накладных листов металлоконструкций / Н.Л. Великанов, С.И. Корягин // Вестник машиностроения. – 2012. – № 12. – С. 13–15.
10. Гаврилов, М.А. Прочностные и деформативные свойства эпоксидных защитных композитов / М.А. Гаврилов, В.Т. Ерофеев. – DOI: 10.54734/20722958_2024_1_59 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1(58). – С. 59–64.
11. Строганов, В.Ф. Эпоксидные полимерные композиции для строительных технологий / В.Ф. Строганов, И.В. Строганов // Строительные материалы. – 2005. – № 11. – С. 20–22.

12. Tamošaitienė, J. A Review of the application of synthetic and natural polymers as construction and building materials for achieving sustainable construction / J. Tamošaitienė, S. Parham, H. Sarvari, D.W.M. Chan, D.J. Edwards. – DOI: 10.3390/buildings14082569 // Buildings. – 2024. – Vol. 14. – 2569.
13. Синелюбов, М.А. Анализ и сравнение методов крепления металлоконструкций / М.А. Синелюбов. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-167-168 // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 5. – С. 167–169.
14. Мысак, В.В. Особенности работы соединений металлических элементов на заклепках различных типов / В.В. Мысак, О.А. Туснина, А.И. Данилов, А.Р. Туснин // Вестник МГСУ. – 2014. – № 3. – С. 82–91.
15. Дайчик, М.Л. Методы и средства натурной тензометрии: справочник / М.Л. Дайчик, Н.И. Пригоровский, Г.Х. Хуршудов. – Москва : Машиностроение, 1989. – 240 с.

References

1. Vedyakov, I.I. Modern Russian standards and issues of the expanding of metal structures in construction / I.I. Vedyakov, P.D. Odesskiy // Bulletin of Scientific Research Center Construction. – 2019. – Vol. 22, No. 3. – P. 42–53.
2. Endzhievsky, L.V. Enclosing and load-bearing building structures made of steel thin-walled profiles / L.V. Endzhievsky, I.I. Krylov, A.N. Kretinin, A.V. Tereshkova. – Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2010. – 282 p.
3. Metal structures. Designer's Handbook / Ed. N.P. Melnikova. – Moscow : Stroyizdat, 1980. – 776 p.
4. Du, Y. Seismic performance of a repaired thin steel plate shear wall structure / Y. Du, J. Hao, J. Yu, H. Yu, B. Deng, D. Lv, Z. Liang. –DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.09.020 // Journal of Constructional Steel Research. – 2018. – Vol. 151. – P. 194–203.
5. Lessig, E.N. Sheet metal structures / E.N. Lessig, A.F. Lileev, A.G. Sokolov. – Moscow : Stroyizdat, 1970. – 489 p.
6. Korolev, V.P. Parameterization of requirements of corrosion protectability of structural steel / V.P. Korolev, I.V. Kushchenko, E.A. Bocharova. – DOI 10.33979/2073-7416-2023-108-4-33-46 // Building and reconstruction. – 2023. – No. 4(108). – P. 33–46.
7. Semenova, I.V. Corrosion and corrosion protection / I.V. Semenova, G.M. Florianovich, A.V. Khoroshilov. – Moscow : Fizmatlit, 2010. – 416 p.
8. Moron, C. Corrosion of supporting steel constructions: a need in the architecture and degree in edification study plans / C. Moron, D. Ferrandez, A. Moron, P. Saiz. – DOI: 10.21125/inted.2019.1742 // 13th International Technology, Education and Development Conference (INTED2019), 11-13 March, 2019, Valencia, Spain. Proceedings. – P. 7191–7196.
9. Velikanov, N.L. Gussets of steel construction parameters calculation / N.L. Velikanov, S.I. Koryagin // Vestnik mashinostroeniya. – 2012. – No. 12. – P. 13–15.
10. Gavrilov, M.A. Durable and deformative properties of epoxy protective composites / M.A. Gavrilov, V.T. Erofeev // Regional architecture and construction. – 2024. – No. 1(58). – P. 59–64. – DOI: 10.54734/20722958_2024_1_59.
11. Stroganov, V.F. Epoxy polymer compositions for construction technologies / V.F. Stroganov, I.V. Stroganov // Construction materials. – 2005. – No. 11. – P. 20–22.
12. Tamošaitienė, J. A Review of the application of synthetic and natural polymers as construction and building materials for achieving sustainable construction / J. Tamošaitienė, S. Parham, H. Sarvari, D.W.M. Chan, D.J. Edwards. – DOI: 10.3390/buildings14082569 // Buildings. – 2024. – Vol. 14. – 2569.
13. Sinelyubov, M.A. Analysis and comparison of the method of fastening metal structures / M.A. Sinelubov. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-167-168 // News of Tula State University. Technical Sciences. – 2023. – No. 5. – P. 167–169.
14. Mysak, V.V. The features of riveted connections of metal elements / V.V. Mysak, O.A. Tushina, A.I. Danilov, A.R. Tusnin // Bulletin of MGSU. – 2014. – No. 3. – P. 82–91.
15. Daichik, M.L. Methods and means of full-scale strain gauging: Handbook / M.L. Daichik, N.I. Prigorovsky, G.Kh. Khurshudov. – Moscow : Mashinostroenie, 1989. – 240 p.

УДК 69.059.32

DOI 10.54734/20722958_2025_3_102

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

Россия, 129337, г. Москва,
Ярославское ш., д. 26,
тел.: +7(495)781-99-88

Бедов Анатолий Иванович,
кандидат технических наук, профессор,
профессор кафедры «Железобетонные
и каменные конструкции»
E-mail: gbk@mgsu.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

Ласьков Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
зав. каф. «Строительные конструкции»
E-mail: lask58@mail.ru

*Уфимский государственный нефтяной
технический университет*

Россия, 450064, Республика Башкортостан,
г.Уфа, ул. Космонавтов, 1,
тел +7 (347) 242-08-59.

Габитов Азат Исмагилович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: zat7@ufanet.ru

Недосеко Игорь Вадимович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: nedoseko1964@mail.ru

Салов Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: salov@list.ru

*National Research Moscow State University
of Civil Engineering*

Russia, 129337, Moscow,
26, Yaroslavskoye St.,
tel.: +7(495)781-99-88

Bedov Anatoly Ivanovich,
Candidate of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Reinforced
Concrete and Stone Structures
E-mail: gbk@mgsu.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

Laskov Nikolay Nikolaevich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
Department of «Building Structures»
E-mail: lask58@mail.ru

Ufa State Petroleum Technical University

Russia, 450064, Republic of Bashkortostan,
Ufa, 1, ul. im. Kosmonavtov,
tel. +7 (347) 242-08-59

Gabitov Azat Ismagilovich,
Doctor of Sciences, Professor, Professor of the
Department «Building Structures»
E-mail: zat7@ufanet.ru

Nedoseko Igor Vadimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Professor of the
Department «Building Structures»
E-mail: nedoseko1964@mail.ru

Salov Aleksander Sergeevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department
«Building Structures»
E-mail: salov@list.ru

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УСИЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТОВ

А.И. Бедов, Н.Н. Ласьков, А.И. Габитов, И.В. Недосеко, А.С. Салов

Представлены результаты анализа и обобщения эффективных современных методов восстановления и усиления наиболее распространенных видов фундаментов зданий. Выявлены факторы, влияющие на выбор методики усиления в зависимости от состояния конструкций и грунтовых условий.

Ключевые слова: фундамент, восстановление, усиление, обойма, опора, подошва, плита, балка

EFFECTIVE METHODS OF RESTORATION AND REINFORCEMENT OF FOUNDATIONS

A.I. Bedov, N.N. Laskov, A.I. Gabitov, I.V. Nedoseko, A.S. Salov

The results of the analysis and generalization of effective modern methods of restoration and reinforcement of the most common types of building foundations are presented. The factors influencing the choice of reinforcement technique depending on the condition of structures and ground conditions are revealed.

Keywords: foundation, restoration, reinforcement, cage, support, sole, plate, beam.

В настоящее время актуальной задачей является оценка морального и физического износа зданий и сооружений. Современные программы реновации предусматривают увеличение площадей существующих жилых зданий и надстройку дополнительных этажей, но не учитывают техническое состояние и фактическую несущую способность фундаментов.

Основными методами восстановления и усиления фундаментов зданий и сооружений являются цементация, устройство бетонных и железобетонных обойм, укрепление фундаментов с расширением подошвы, усиление буроинъекционными и призматическими сваями. Если реконструируемое или ремонтируемое здание имеет трещины и другие повреждения, вызванные неравномерными деформациями, то, как правило, эти повреждения распространяются и на фундаменты. В этом случае в проект реконструкции необходимо включить совместный ремонт конструкций надземной части здания и фундаментов. При проектировании ремонта деформируемых стен следует предусматривать возможность частичной разгрузки поврежденных участков путем передачи нагрузки на соседние элементы фундаментов. В этом и других случаях (увеличение нагрузок, надстройка здания и т.п.) может оказаться, что прочность существующих фундаментов недостаточна или давление под подошвой фундамента превышает расчетное сопротивление грунта. Тогда, в зависимости от ситуации, приходится прибегать к различным мероприятиям, связанным как с ремонтом и усилением фундаментов, так и с укреплением грунтов оснований [1–2].

Практика показывает, что наиболее простым и эффективным методом усиления поврежденных и ослабленных бутовых и кирпичных фундаментов является устройство одно- и двусторонних бетонных (железобетонных) рубашек с последующим инъецированием раствора в кладку фундаментов через оболочку рубашек.

Укрепление кладки фундаментов. Если прочность материала бутового, бетонного или железобетонного фундамента недостаточна или имеются отдельные повреждения, его целесообразно укрепить путем инъекции цементного раствора, синтетических смол и т.п. Для этого с двух сторон отрывают траншеи, в кладке фундамента пробуривают перфоратором или пробивают скважины (шпуры) для установки инъекторов диаметром 25 мм, промывают их водой и закладывают в них инъекционные трубки, после закрепления которых траншеи засыпают грунтом с послойным его уплотнением (рис. 1, а). Диаметр отверстий должен быть на 2-3 мм больше диаметра инъектора, а глубина погружения инъекторов в кладку должна составлять 0,4-0,6 ширины фундамента. Затем через трубки нагнетают цементный раствор состава 1:1 (цемент – вода) или полимерные составы под давлением 0,2-0,6 МПа. Обычно зона закрепления кладки составляет объем диаметром 0,6-1,2 м вокруг инъектора [1-2]. Из этого условия исходят при определении расстановки инъекторов. Как правило, расстояние между инъекторами вдоль ленточного фундамента в зависимости от степени разрушения кладки принимается равным 50-100 см. При одиночных фундаментах устанавливают не менее двух инъекторов с каждой стороны. Средний расход цементного раствора при закреплении фундамента составляет 25-35 % объема ослабленной кладки.

При наличии подвала отпадает необходимость рытья траншеи, т.к. доступ к фундаменту возможен со стороны подвала (рис. 1, б).

Для укрепления кладки фундамента при наличии сквозных вертикальных трещин может быть применен метод цементации с устройством железобетонной рубашки

(рис. 1, в). При разрывах в кладке фундаментов от морозного пучения грунта также для ее укрепления можно использовать двустороннее инъецирование с предварительной отрывкой траншей и последующей их засыпкой непучинистым грунтом (рис. 1, г).

Обычно при цементации тела фундамента проводят цементацию контакта «фундамент – грунт». Эта операция целесообразна в случае основания, сложенного насыпными, песчаными и гравийно-галечниковыми грунтами. В случае залегания в уровне подошвы фундамента глинистых грунтов цементация контакта «фундамент – грунт» может привести к неконтролируемому распространению цементирующего раствора.

Иногда, при незначительном расслоении кирпичной или бутовой кладки, ограничиваются торкретированием поверхности фундамента, а закрепление бетонных и железобетонных фундаментов, имеющих трещины, – инъецированием синтетических смол.

Укрепление фундаментов и стен подвалов бетонными и железобетонными обоймами выполняют или при неработоспособном их состоянии, или если возникает необходимость в более капитальных работах по укреплению деформировавшихся или ослабленных фундаментов, или по каким-либо причинам цементацию провести невозможно. Обоймы рекомендуются, когда прочность у нижележащих участков фундамента стен ниже, чем у вышележащих. Такие обоймы могут быть односторонними и двусторонними. Минимальная толщина бетонной обоймы 10-15 см, железобетонной – не менее 15 см. Взятие фундамента в обойму приводит к некоторому увеличению ширины подошвы фундамента [3]. Для того чтобы более полно включить в работу не обжатые ранее под уширяемой частью фундамента участки грунта, в него втрамбовывают 5-10-сантиметровый слой щебня или гравелистого песка. Работы производятся захватками по 2,0-2,5 м в следующей последовательности: отрывка траншей на захватку; пробивка в фундаменте штраб; очистка фундамента; установка опалубки, арматуры и анкерных связей; укладка бетона пластичной консистенции с мелкой фракцией крупного заполнителя с его уплотнением (рис. 2, а, б). После твердения бетона через 6-7 дней опалубка снимается, и выполняется гидроизоляция.

Бетонная обойма скрепляется с телом фундамента анкерными стержнями диаметром 20 мм, закладываемыми через 1,0-1,5 м. Железобетонная обойма армируется сеткой и заделывается в теле фундамента с помощью анкеров и несущих балок.

Важной задачей при устройстве обойм является обеспечение прочного сцепления нового бетона со старым. Для этого используются различные методы очистки поверхности усиливаемого фундамента, когда с его поверхности удаляются не только грязь, сажа, масла и пр., но и поврежденный, а также низкокачественный бетон или раствор кладки. Для очистки фундаментов могут применяться: промывка водой под высоким давлением или смесью воды со сжатым воздухом; промывка раствором соляной кислоты; пескоструйная очистка сухим или мокрым способом; механическая обработка поверхности для обеспечения ее шероховатости. Шероховатость обетонированного фундамента создается насечкой перфораторами или отбойными молотками со специальными насадками. При малых объемах работ обработка поверхности фундамента может производиться вручную зубилом или металлическими щетками.

При усилении железобетонных фундаментов необходима также проверка состояния арматуры. После удаления разрушенного защитного слоя на ослабленных участках необходимо простукиванием установить качество сцепления арматуры с бетоном. В тех случаях, когда оно отсутствует, целесообразно арматуру обнажить так, чтобы между ней и старым бетоном образовался промежуток не менее 20 мм, что гарантирует заполнение расчищенных мест новым бетоном [1-2]. Арматура перед бетонированием должна быть зачищена стальной щеткой или пескоструйной установкой. Если в обойму заключается бутобетонный фундамент, то для лучшего сцепления старого бетона с новым раствором кладки целесообразно удалить с его поверхности на глубину 1,5 см.

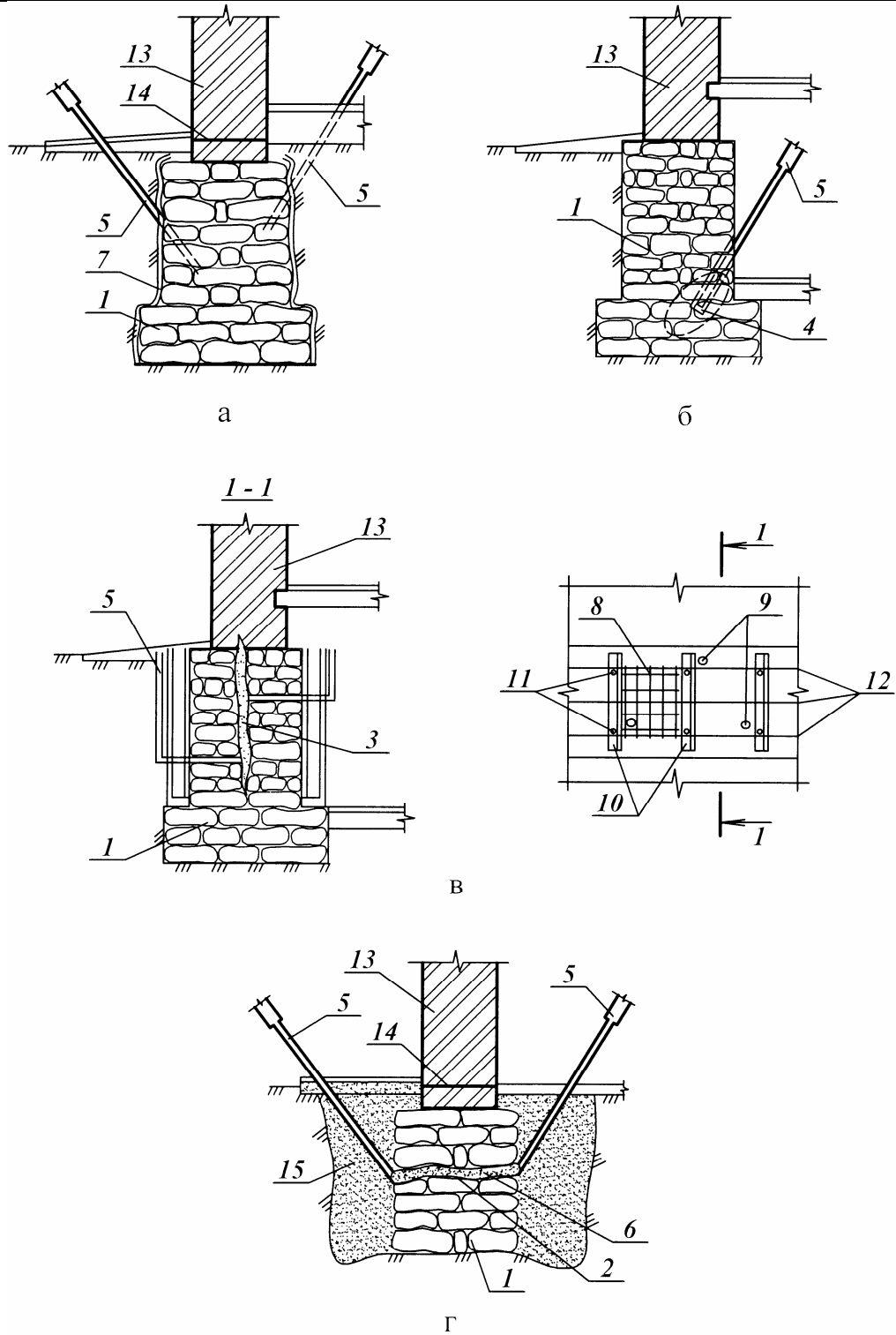


Рис. 1. Усиление бутобетонных ленточных фундаментов методом инъектирования:

а – двустороннего; б – одностороннего при наличии подвала;

в – цементация с устройством железобетонной рубашки;

г – цементация при разрыве фундамента от морозного пучения грунта;

1 – существующий фундамент; 2 – разрыв в фундаменте от морозного пучения;

3 – вертикальная трещина в кладке; 4 – скважины, просверленные в фундаменте;

5 – инъекционные трубки для нагнетания раствора с внутренним диаметром 25 мм; 6 – жидкий цементный раствор; 7 – наплывы раствора; 8 – сетка из стержней Ø 4, шаг 100×100;

9 – отверстия для инъекторов $d=37$ мм; 10 – уголки каркаса $\angle 75 \times 6$; 11 – болты Ø 20 А-I;

12 – арматура Ø 12 А-I; 13 – кирпичная стена; 14 – гидроизоляция; 15 – непучинистый грунт

При значительном ослаблении нижней части фундамента, вызванном агрессивными водами, гниением древесины или другими причинами, прибегают к ее замене бетонным или железобетонным элементом (рис. 2, в). При этом на период ремонтных работ нагрузку от надфундаментного строения передают на соседние участки через металлические подкрепляющие балки. Подобную схему применяют и при увеличении глубины заложения фундаментов. Разгрузка фундаментов под стены для их замены может быть осуществлена также путем вывешивания стен на подкосах (см. рис. 2, в) или вывешивания частей здания на поперечных стальных балках (см. рис. 2, г).

Если при вскрытии ленточного фундамента выявлены выветривание раствора в швах кладки и нарушение формы фундамента с выклиниванием отдельных камней, рекомендуется его перекладка с выполнением таких операций, как: пробивка штраб под тычковым рядом кладки для заводки в них разгрузочных балок на 2-3 ряда выше обреза фундамента; установка балок на цементно-песчаный раствор и стягивание их болтами диаметром 14-18 мм, пропущенными через отверстия, просверленные в кладке стены; откопка котлована с креплением стенок; разборка кладки отбойными молотками (бутовый камень очищается для вторичного использования); выполнение новой кладки на цементно-песчаном растворе (см. рис. 2, б).

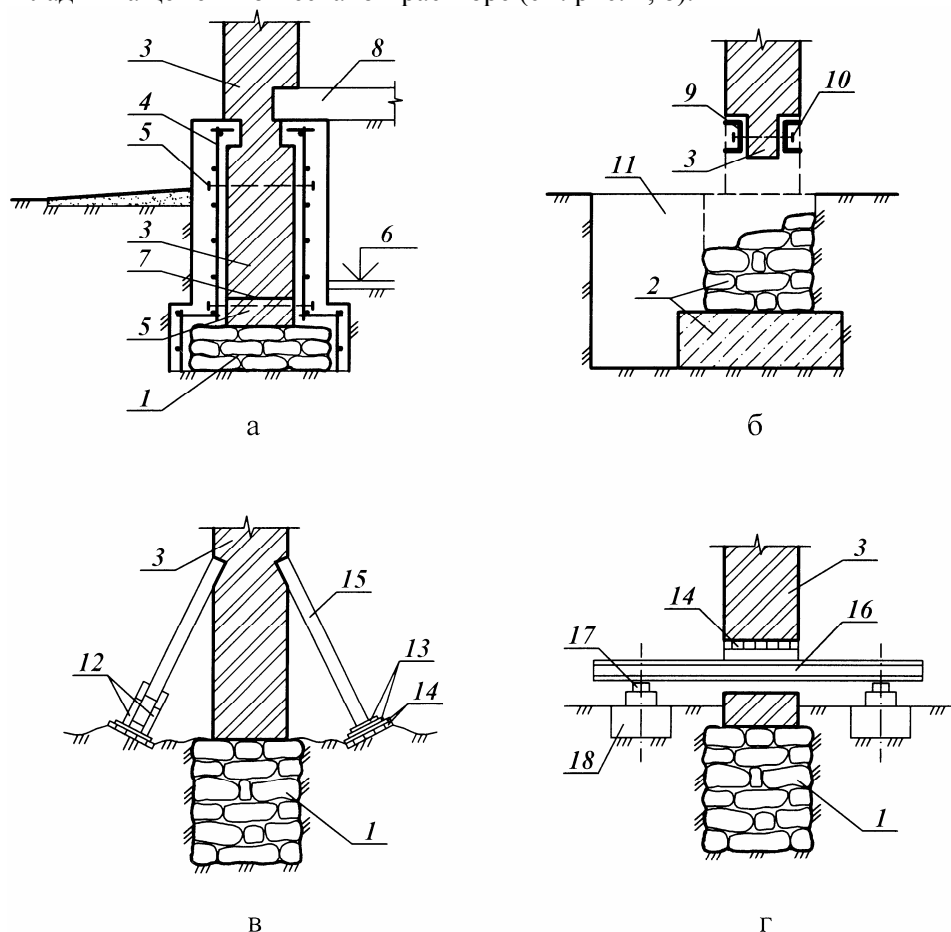


Рис. 2. Усиление фундаментов железобетонными обоймами и путем перекладки:
а – устройством железобетонной обоймы; б – замена слабых участков фундаментов под стены с использованием разгрузочных балок; в – вывешивание частей здания на подкосах для замены фундаментов под стены; г – вывешивание частей здания на поперечных балках для замены фундаментов под стены;

1 – существующий фундамент; 2 – подведённый фундамент; 3 – кирпичная стена;
4 – железобетонная обойма; 5 – анкера; 6 – отметка пола подвала; 7 – гидроизоляция;
8 – перекрытие над подвалом; 9 – разгружающие балки; 10 – стяжной болт; 11 – шурф;
12 – домкраты; 13 – клинья; 14 – прокладки; 15 – подкосы; 16 – металлическая поперечная балка; 17 – гидравлические домкраты (или подкладки); 18 – временные опоры

Уширение фундамента, устройство промежуточных опор. Усиление ленточных фундаментов путем расширения подошвы рекомендуется для увеличения их несущей способности при увеличении нагрузки вследствие реконструкции или надстройки здания, а также для восстановления фундаментов, получивших повреждения от механических и химических воздействий [1-2].

Отличительной особенностью метода является введение в работу новой дополнительной площади естественного основания.

Усиление фундаментов с расширением подошвы осуществляют с помощью устройства односторонних (при внецентренном приложении нагрузки) и двусторонних (при центральной нагрузке) банкет (рис. 3).

Основным техническим условием при устройстве банкет является их жесткое соединение с существующим фундаментом. Для этого их примыкание производится с помощью штраб либо специальных металлических или железобетонных разгружающих балок, принимаемых по расчету и расположенных при усилении ленточных фундаментов через 1,5-2 м. При уширении фундаментов отдельно стоящих опор обоймы устраиваются одновременно со всех сторон колонны.

Из условия производства работ минимальная ширина банкета в нижнем обресе должна составлять 30 см, в верхнем – 20 см. Высота железобетонного банкета на концах консолей должна быть 20-25 см. Для опирания разгружающих балок применяют швеллеры или двутавры C , I 16÷18, рассчитывая их на действующие нагрузки. Усиление может быть также выполнено посредством возведения дополнительных участков каменной кладки.

Устройство под зданием фундаментной плиты. При реконструкции зданий, возведенных на неоднородном основании, сложенном слабыми грунтами, и при необходимости передачи больших дополнительных нагрузок, вызывающих опасность значительных неравномерных деформаций, эффективным решением является подводка под здание монолитной фундаментной плиты. На рис.4 показан пример такого решения для здания, имевшего до реконструкции ленточные фундаменты. Фундаментную плиту целесообразно располагать на высоте $h=75-80$ см от подошвы существующих фундаментов. Плита армируется по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Толщина ее определяется расчетом и составляет не менее 25 см. Заделку в стены существующих фундаментов выполняют на 35-40 см. Материал стены в месте заделки плиты проверяется на местное сжатие. Сечение прогонов обычно составляет 50x100 см, ребер – 30x40 см с шагом порядка 2,5 м.

Перед устройством фундаментной плиты под нее укладывается щебеночная подготовка общей толщиной 15-20 см с плотной послойной трамбовкой или подготовкой из «тощего» бетона (класс бетона по прочности на сжатие B5, B7,5).

Работы по устройству плиты следует проводить захватками протяженностью 3-4 м. Захватки рекомендуется чередовать так, чтобы штрабы в существующем фундаменте пробивали не ранее чем через 3 суток после бетонирования соседних предыдущих захваток. Следует обращать особое внимание на тщательность заполнения бетоном штраб и гнезд, выбранных в существующем фундаменте.

Заглубление фундаментов. К увеличению глубины заложения фундаментов прибегают в случае необходимости увеличения глубины подвала, переноса подошвы фундамента на более плотные нижележащие слои грунта и т.д.

У ленточных фундаментов эта операция проводится в такой последовательности (рис. 5). Сначала в несущей стене прорубаются отверстия, через которые пропускаются разгружающие балки. Концы балок устанавливаются на бетонные тумбы или шпальные клетки и надежно подклиниваются. Учитывая возможность осадки опор при передаче на них нагрузки от стен при разборке фундамента, целесообразно опирать балки на домкраты. Это позволяет регулировать положение опор при производстве работ.

После передачи нагрузки от стен на внешние опоры ленточный фундамент разбирается и устраивается новый до более глубокой отметки. Работы ведутся захватками по 2,5-3,0 м.

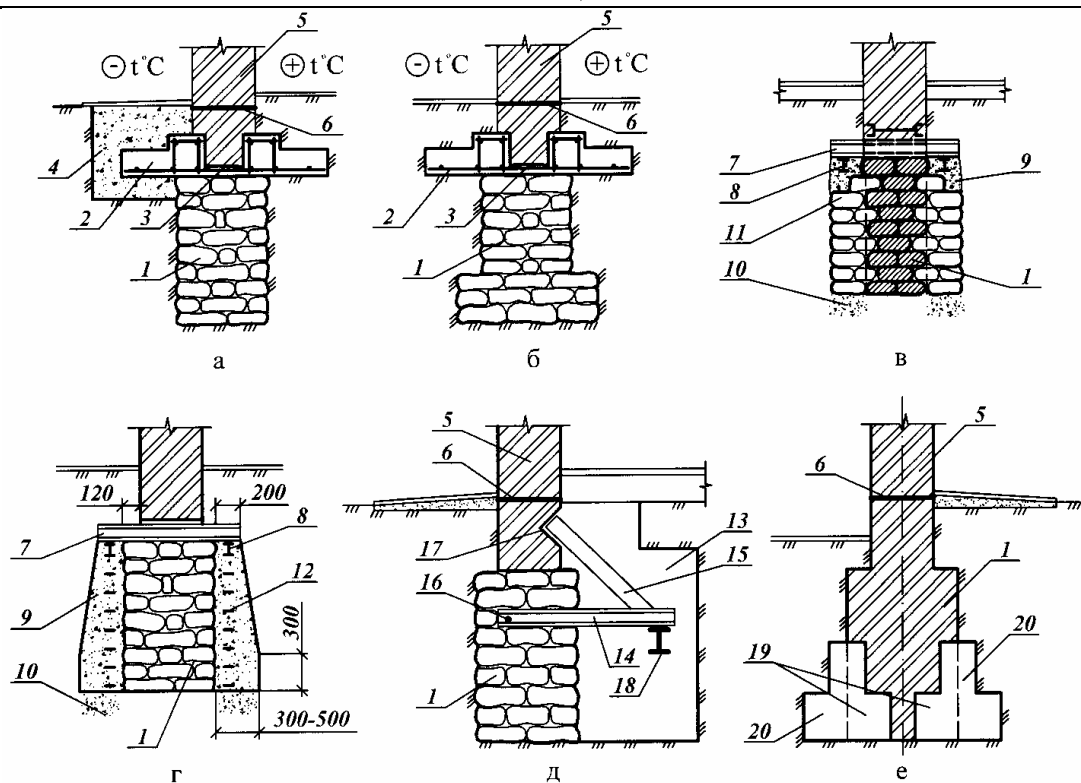


Рис. 3. Усиление фундаментов увеличением их опорной площади:

- а – устройством монолитного гибкого железобетонного банкета (для наружных стен);
 б – то же (для внутренних стен); в – расширение фундамента бутовой кладкой;
 г – обетонированием узкого фундамента с установкой связей (штырей) из стержней Ø16 мм в шахматном порядке; д – одностороннее увеличение опорной площади;
 е – с устройством дополнительной кирпичной кладки;
- 1 – существующий фундамент; 2 – монолитная железобетонная подушка; 3 – отверстие заделываемое цементно-песчаным раствором под давлением; 4 – утеплитель из керамзитового гравия (или другого эффективного материала); 5 – кирпичная стена; 6 – гидроизоляция; 7 – распределительные балки; 8 – опоры балок – двутавры 16÷18; 9 – бетон класса В12.5÷В15; 10 – уплотненный щебнем грунт; 11 – новая кладка; 12 – штыри-связи Ø16 мм в шахматном порядке; 13 – монолитный банкет; 14 – несущая балка; 15 – подкос; 16 – анкер; 17 – уголок; 18 – распределительная балка; 19 – участки частичной разборки существующей кладки фундамента; 20 – дополнительная кирпичная кладка

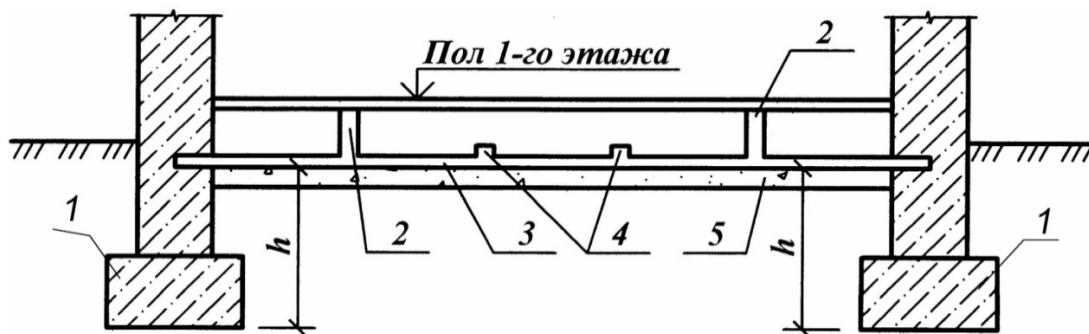


Рис. 4. Подводка под здание фундаментной плиты:

- 1 – существующий фундамент; 2 – ребра фундаментной плиты; 3 – ребристая железобетонная фундаментная плита; 4 – ребра жесткости; 5 – щебеночная подготовка или подготовка из «тощего» бетона

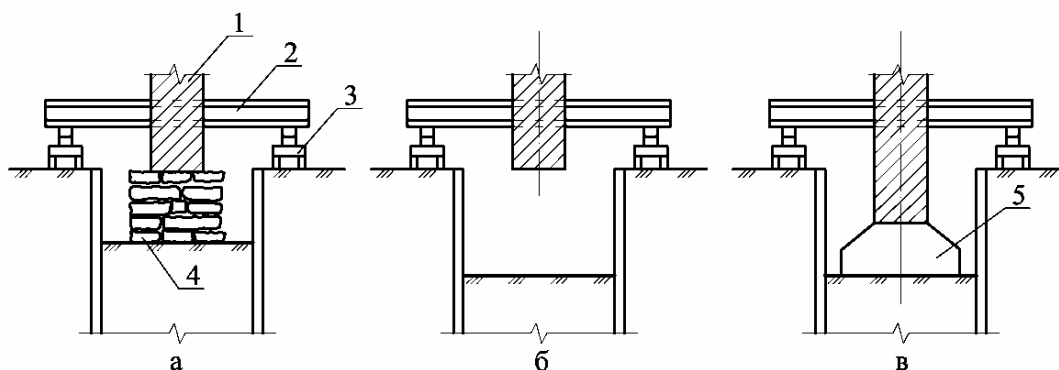


Рис. 5. Заглубление ленточных фундаментов:

а – монтаж балок; б – разборка старого фундамента; в – устройство нового фундамента;
1 – несущая стена; 2 – распределяющие балки; 3 – опоры; 4 – старый фундамент;
5 – новый фундамент

При заглублении фундаментов под столбы или колонны применяют простые подкосы (рис. 6, а) или подкосы с затяжкой (рис. 6, б). В первом случае столб предварительно закрепляют подкосами, разбирают старый фундамент, углубляют котлован до требуемой отметки и изготавливают новый фундамент. Недостатком этой технологии заглубления фундамента является податливость опорных частей подкосов, что может привести к осадке столба с последующими неравномерными деформациями надфундаментных конструкций. Этого можно избежать, используя для вывешивания столба специальную конструкцию, состоящую из подкосов с затяжкой. Такую конструкцию принято называть «ножницами».

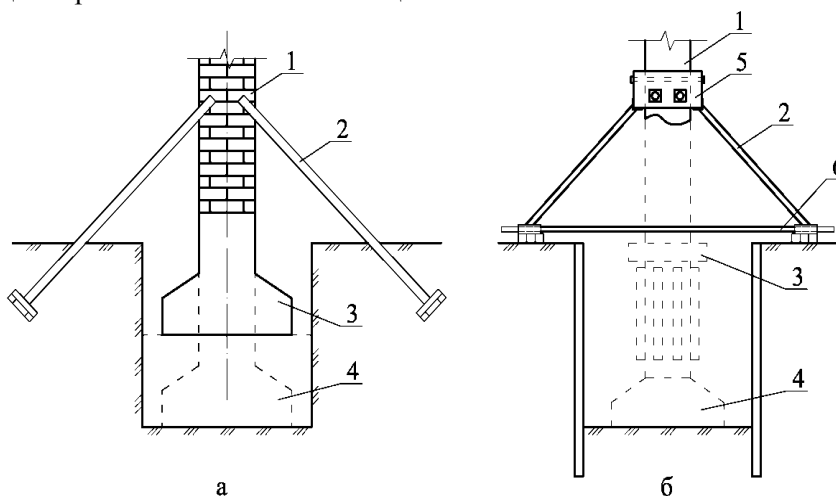


Рис. 6. Заглубление столбчатых фундаментов:

а – с применением поддерживающих подкосов;
б – с применением поддерживающих подкосов с затяжкой;
1 – столб; 2 – подкос; 3 – старый фундамент; 4 – новый фундамент; 5 – воротник;
6 – металлическая затяжка

По этому методу первоначально вокруг столба бетонируется воротник, в который упираются стальные подкосы, стянутые в нижней части стальными анкерами, натяжение которых в процессе производства работ может регулироваться гайками. Вся конструкция устанавливается на шпальных клетках, уложенных на уплотнённое основание.

С помощью гидравлических домкратов опорные части «ножниц» поднимают настолько, чтобы вся нагрузка от столба передавалась на подкосы, после чего нижнюю

часть столба и старый фундамент разбирают и возводят новый фундамент с более глубокой отметкой.

Как в случае ленточных, так и отдельно стоящих фундаментов новый фундамент после устройства его подошвы на более глубокой отметке должен быть включен в совместную работу с надфундаментной конструкцией. Для этого прибегают к инъектированию песчано-цементного раствора под давлением в зону контакта фундамент – грунт, подклиниванию и т.п.

Заключение. Выполнен анализ основных методов восстановления и усиления фундаментов, которые применяются при реконструкции и ремонте зданий. Рассмотрены различные технологии, включая цементацию, устройство бетонных и железобетонных обойм, расширение подошвы фундамента, инъектирование растворов, а также замену и заглубление оснований. Отмечено, что выбор метода зависит от состояния существующего фундамента, характера деформаций и условий эксплуатации здания.

Наиболее эффективные меры по усилению – это комплексные решения, обеспечивающие перераспределение нагрузок и повышение несущей способности оснований. Укрепление кладки фундаментов, устройство дополнительных опор и фундаментных плит позволяют адаптировать здания к увеличенным эксплуатационным нагрузкам.

Рассмотренные технологии могут быть полезны проектным организациям и строительным компаниям при выполнении работ по модернизации зданий и сооружений.

Список литературы

1. Бедов, А.И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений : в 2 ч. Часть 1. Обследование и оценка технического состояния оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений / А.И. Бедов, В.В. Знаменский, А.И. Габитов. – Москва : Изд-во АСВ, 2023 (2021, 2014, 2016). – 704 с.
2. Бедов, А.И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений : в 2 ч. Ч.II. Восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений / А.И. Бедов, А.И. Габитов, В.В. Знаменский ; под ред. А.И. Бедова. – Москва : АСВ, 2023 (2021, 2017). – 924 с.
3. Горячев, М.Г. Обоснование значений модулей общей деформации стабилизированных грунтов с учетом их классификации по индексу непосредственной несущей способности / М.Г. Горячев, А.А. Ретюнский, А.С. Набатчиков // Транспортное строительство. – 2024. – № 1. – С. 20–23.

References

1. Bedov, A.I. Assessment of the technical condition, restoration and reinforcement of the foundations of building structures of operated buildings and structures : in 2 parts. Part I. Inspection and assessment of the technical condition of the foundations and building structures of operated buildings and structures / A.I. Bedov, V.V. Znamensky, A.I. Gabitov. – Moscow : Publishing House of the DIA, 2023 (2021, 2014, 2016). – 704 p.
2. Bedov, A.I. Assessment of the technical condition, restoration and reinforcement of foundations and building structures of operated buildings and structures : in 2 parts. Part II. Restoration and reinforcement of foundations and building structures of operated buildings and structures / A.I. Bedov, A.I. Gabitov, V.V. Znamensky ; Edited by A.I. Bedov. – Moscow : DIA, 2023 (2021, 2017). – 924 p.
3. Goryachev, M.G. Substantiation of the values of the modules of general deformation of stabilized soils, taking into account their classification according to the index of direct bearing capacity / M.G. Goryachev, A.A. Retyunsky, A.S. Nabatchikov // Transport construction. – 2024. – No. 1. – P. 20–23.

УДК 624

DOI 10.54734/20722958_2025_3_111

Казанский государственный
энергетический университет

Россия, г. Казань, ул.Красносельская, 51

Айзатуллин Марат Мансурович,

аспирант кафедры «Энергообеспечение
предприятий, строительство зданий
и сооружений»

E-mail: marat.ayzatullin@tatar.ru

Зиятдинов Самат Булатович,

аспирант кафедры «Энергообеспечение
предприятий, строительство зданий
и сооружений»

E-mail: zsamat29@gmail.com

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 State Power Energy University (KGEU)

Russia, Kazan, 51, Krasnoselskaya St.

Ayzatullin Marat Mansurovich,

Postgraduate student of the Department
«Energy Supply of Enterprises, Construction of
Buildings and Structures»

E-mail: marat.ayzatullin@tatar.ru

Ziyatdinov Samat Bulatovich,

Postgraduate student of the Department
«Energy Supply of Enterprises, Construction of
Buildings and Structures»

E-mail: zsamat29@gmail.com

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

УЗЛЫ СОПРЯЖЕНИЙ ПОРТАЛЬНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ОПОР

М.М. Айзатуллин, С.Б. Зиятдинов, Л.С. Сабитов, И.А.Гарькина

Определяются методы повышения несущей способности узлов соединения свайных конструкций с новыми порталными опорами. Показывается, что традиционные распорные узлы обладают ограниченной несущей способностью, а их увеличение приводит к ухудшению технико-экономических показателей. Применение кольцевой поперечной диафрагмы шпоночного соединения позволяет в 2–3 раза увеличить несущую способность без значительного роста расхода материалов.

Рассматриваются узлы с выпусками арматуры, которые обеспечивают широкий диапазон регулирования несущей способности при незначительном увеличении металлоемкости; их практическое применение не приводит к сложностям организационного или технологического характера. Разработанные методики расчета распорных узлов и узлов с выпусками спиралей показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, что дает возможность их использования в проектировании.

Ключевые слова: свайные конструкции, порталные опоры, узел сопряжения, распорные узлы, типы опирания, свая-оболочка, конструктивные решения, несущая способность

CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF CONJUGATION NODES COMBINED GANTRY SUPPORTS

M.M. Ayzatullin, S.B. Ziyatdinov, L.S. Sabitov, I.A. Garkina

Methods for increasing the bearing capacity of pile structure connection units with new portal supports are determined. It is shown that traditional spacer units have limited bearing capacity, and their increase leads to deterioration of technical and economic indicators. The use of an annular transverse diaphragm of a keyed connection allows increasing the bearing capacity by 2–3 times without a significant increase in material consumption. Units with reinforcement outlets are considered, which provide a wide range of adjustment of the bearing capacity with an insignificant increase in metal consumption; their practical application does not lead to organizational or technological difficulties. The developed methods for calculating spacer units and units with spiral outlets have showed satisfactory convergence with experimental data, which makes it possible to use them in designing.

Keywords: pile structures, portal supports, coupling unit, spacer units, support types, shell pile, design solutions, bearing capacity

Портальные опоры являются ключевыми конструктивными элементами, используемыми в различных областях строительства и инженерии (строительство в энергетике; промышленное и гражданское строительство (создание несущих каркасов зданий), транспортные магистрали (контактные сети железнодорожного транспорта, размещение дорожных указателей)).

Благодаря своей универсальности и высоким эксплуатационным характеристикам портальные опоры стали неотъемлемым компонентом современных строительных проектов (рис. 1; портальные опоры различного назначения).

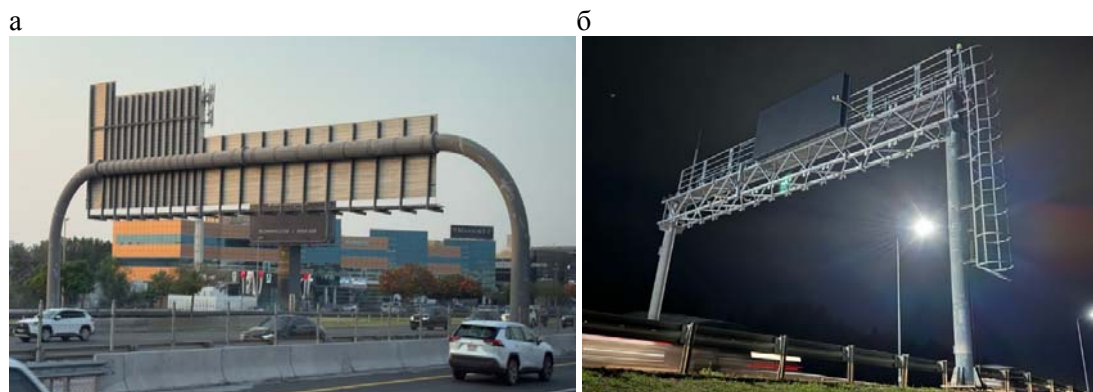


Рис. 1. Конструкции портальных опор:

а – сплошнотенчатое сечение; б – комбинированный тип

Ниже предложены три инновационных технических решения по модернизации портальных опор (рис. 2), разработанных с учетом возрастающих эксплуатационных нагрузок. Каждое решение отличается уникальной конфигурацией и особым подходом к усилению конструкции. Предложенные методы позволяют эффективно противодействовать постоянно возрастающим нагрузкам, обеспечивая экономическую целесообразность модернизации [1...3].

Очевидным достоинством применения полых круглых свай и свай-оболочек является возможность непосредственного сопряжения стойки с фундаментом путем заделки ее во внутреннюю полость свай.

При строительстве объектов со сравнительно небольшими нагрузками на фундаменты (например опор порталов) применялся распорный узел сопряжения, состоящий из монолитной бетонной пробки, на которую опирается колонна, и бетона замоноличивания, заполняющего зазор между колонной и полый круглой сваей; в узле сопряжения пробка опирается на внутреннюю консоль.

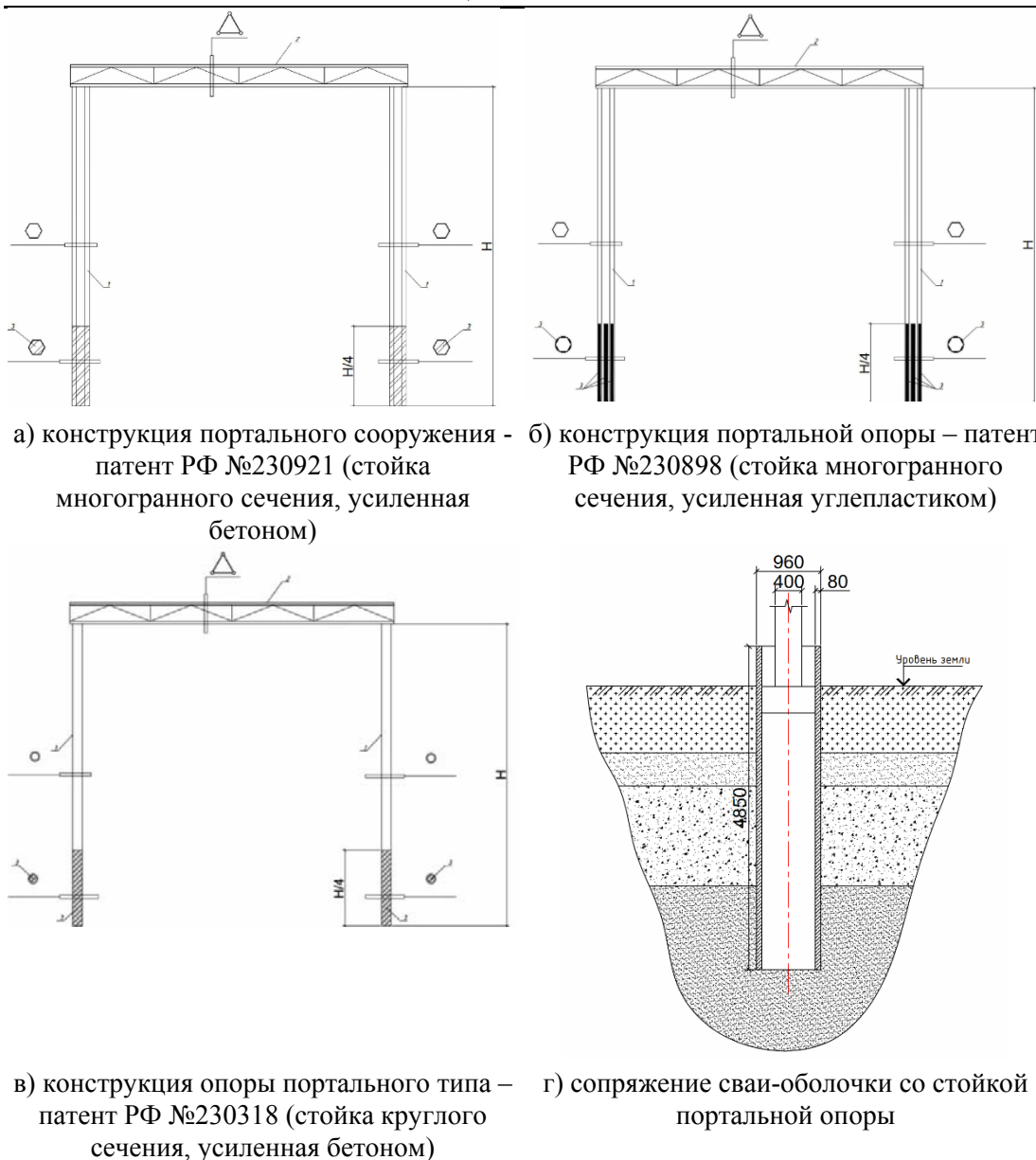


Рис. 2. Новые конструкции порталных сооружений и их элементов

В предложенных методиках расчета узлов сопряжений колонн с полыми круглыми сваями рассматривались две возможные схемы разрушений:

- разрыв стенок свай от поперечных деформаций колонны;
- продавливание колонны от среза, бетона по граням колонны и боковой поверхности бетонной пробки.

Экспериментальные исследования распорного узла сопряжения колонны с моделью полый круглой свай из бетона в металлической рубашке подтвердили наличие в стенках растягивающих кольцевых напряжений, которые и разрывают бетон стенок. В расчетах по разрыву стенок полый круглой свай использовались методы теории упругости, что, как оказалось, не в полной мере соответствует действительной работе узла (вводились эмпирические поправочные коэффициенты).

В последнее десятилетие в практике промышленного строительства все шире используются прогрессивные типы сооружений с большими пролетами, укрупненной сеткой колонн, что приводит к увеличению удельной нагрузки на фундамент. С началом освоения производства и применения центрифугированных свай-оболочек появилась возможность использования односвайных фундаментов с большой несущей способностью по грунту: возникла необходимость конструктивных решений,

методики расчета узлов сопряжений стоек с центрифугированными сваями-оболочками под расчетную вертикальную нагрузку (до 2000 кН).

Были запроектированы и испытаны узлы сопряжения колонн со сваями-оболочками с указанными на рис.3 типами У1...У4:

У1 – распорные, передающие вертикальную нагрузку за счет сцепления старого и нового бетонов, а также механического зацепления бетона пробки и замоноличивания с шероховатой внутренней поверхностью сваи-оболочки, с усиленным поперечным армированием сваи в зоне узла;

У2 – с выпусками арматуры, представляющими собой частично выступающие из тела сваи-оболочки витки проволочных спиралей;

У3 – с опиранием пробки на кольцевую бетонную диафрагму;

У4 – со шпоночным соединением пробки со свай-оболочкой.

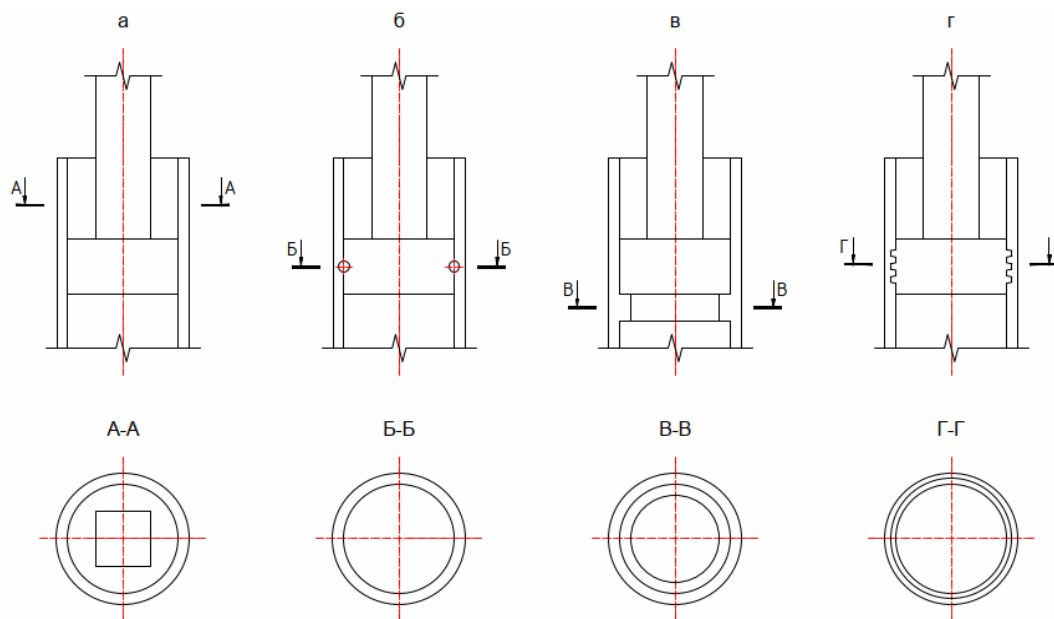


Рис. 3. Конструктивные типы узлов сопряжений стоек порталных опор со сваями-оболочками: а – распорный (У1); б – с выпусками спиральной арматуры (У2); в – с бетонной диафрагмой (У3); г – со шпоночным соединением пробки со свай (У4)

Стойки порталных опор сечением 400х400 мм заделывались в центрифугированную сваю-оболочку диаметром 960 мм на глубину 750 мм. Толщина стенок сваи-оболочки 80 мм, монолитной бетонной пробки 500 мм. Армирование сваи-оболочки состояло из каркаса ствола, каркаса головы и каркаса концевой участка. Каркасы ствола изготавливались на станке марки Г-207А, каркасы головы – из плоских сеток.

Спирали, используемые для выпусков арматуры из свай-оболочек в узлах типа У2, навивались из проволоки диаметром 5 мм класса В-1 на токарном станке, вручную растягивались до заданного шага и закручивались на продольные или поперечные стержни каркаса ствола сваи. Диаметр витков спиралей принимался равным от 65 до 120 мм.

Для получения кольцевой бетонной диафрагмы и пазов в сваях-оболочках к арматурным каркасам прикреплялись фанерные вкладыши, которые после бетонирования сваи и набора прочности бетоном извлекались.

Свай-оболочки изготавливались на ременной центрифуге РТЦ-5 в разъемных металлических формах для безнапорных труб длиной 4850 мм (по два образца одновременно). Свай-оболочки и колонны изготавливались из бетона проектной марки 40 МПа. Бетон пробки и замоноличивания проектной марки 30 МПа уплотнялся глубинным вибратором.

Узлы сопряжения испытывались на гидравлическом прессе ИПС-1000. С помощью индикаторов часового типа замерялись величины смещения колонны относительно

сваи-оболочки и бетона замоноличивания, с помощью тензодатчиков – деформации бетона сваи-оболочки. Контроль прочности бетона производился по стандартным вибрированным кубам.

Основные показатели сваи-оболочек распорных узлов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Основные показатели сваи-оболочек распорных узлов

Марка узла	Толщина стенки стакана S , см	Сопротивление осевому растяжению бетона R_p , МПа	Расчетная высота стенки H , см	Расчетная площадь поперечной арматуры F_x , см ²
У1.1	8,2	2,13	98	9,5
У1.2	8,0	2,23	109	12,5
У1.3	8,4	2,68	109	11,5

Для центрально-нагруженных распорных узлов характерен медленный рост смещения до значений 0,1-0,15 мм начала загрузки до нагрузки, не превышающей 0,5 разрушающей. По-видимому, на этой стадии еще не нарушено сцепление нового бетона (бетона пробки и замоноличивания) со старым (бетоном сваи-оболочки). С дальнейшим ростом нагрузки происходит резкий рост величины смещения: прирост смещения за ступень нагружения составлял 0,8-1,0 мм. На этапе перед разрушением (80-90 % от разрушающей нагрузки) в свае-оболочке в зоне пробки и бетона замоноличивания появлялись продольные трещины с шириной раскрытия 0,05 мм.

На нижней поверхности пробок трещины не были обнаружены. В некоторых узлах незначительная часть бетона замоноличивания откалывалась и оставалась на свае-оболочке при смещении колонны. Следовательно, можно предположить, что пробка и бетон замоноличивания перемещаются совместно с колонной как одно целое.

Проскальзывание колонны происходило только после образования продольных трещин в свае-оболочке, к моменту образования которых колонна имела смещение 1,5-3,0 мм, что свидетельствует о нарушении сцепления бетона пробки и замоноличивания с бетоном сваи-оболочки. Передача вертикальных усилий от колонны на сваю-оболочку может осуществляться за счет сил трения, которые возникают в результате среза или огибания образовавшихся на поверхности контакта неровностей, только при наличии прижимающего усилия, действующего нормально к направлению сил сдвига. Наличие такого усилия обеспечивает свая-оболочка, работающая как обойма, аналогично тому, как это принято при расчете ростверков [4].

При смещении колонны на бетон замоноличивания на пробку действуют сжимающие, предположительно, равномерно распределенные силы, а на сваю-оболочку – соответствующие им силы распора (внутреннего давления). Соотношение между величиной сил распора и величиной вертикальной силы, действующей на колонну, по-видимому, равняется коэффициенту трения бетона по бетону.

Действие сил распора на сваю-оболочку вызывает в стенках сваи появление растягивающих кольцевых напряжений, разрывающих бетон стенок. С образованием продольных трещин кольцевое растягивающее усилие передается на поперечную арматуру сваи-оболочки. При недостаточном количестве арматуры ее деформация приводит к увеличению диаметра сваи-оболочки и проскальзыванию колонны практически одновременно с образованием продольных трещин.

Рассматривая условие равновесия сваи-оболочки (аналогично расчету стаканного сопряжения круглых колонн с ростверками [5]), в которой под действием сил распора появляются только растягивающие напряжения, получаем следующие формулы:

– для расчета по прочности

$$N = 2\pi\mu R_a F_x ;$$

– для расчета по трещинообразованию

$$N_{тр} = 2\pi\mu R_{pl} (SH + 2nF_x) ;$$

здесь N – вертикальная разрушающая нагрузка; $N_{тр}$ – вертикальная нагрузка, при которой в свае-оболочке образуются продольные трещины; $\mu = 0,7$ – коэффициент трения бетона по бетону; R_a – расчетное сопротивление растяжению поперечной арматуры сваи-оболочки; H – расчетная высота стенок сваи-оболочки; F_x – площадь сечения поперечной арматуры свай-оболочки, расположенной в пределах расчетной высоты H ; $R_{пл}$ – расчетное сопротивление осевому растяжению бетона сваи-оболочки для предельных состояний второй группы; S – толщина стенки сваи-оболочки; n – отношение модулей упругости поперечной арматуры сваи-оболочки и бетона сваи.

Согласно исследованиям моделей распорных узлов методами фотоупругости, проведенным в НИИПромстрое, расчетная высота стенок сваи-оболочки может быть принята равной

$$H = h_1 + \frac{h_c + r_1}{2},$$

где h_1 – толщина бетонной пробки; h_c – глубина стакана; r_1 – внутренний радиус сваи-оболочки.

Сопоставление расчетных и опытных данных приведено в табл. 2. Расчет по прочности дает удовлетворительную сходимость. Большое расхождение в расчете по трещинообразованию, вероятно, обусловлено несоответствием величин сопротивления осевому растяжению бетона свай-оболочек, определенных по вибрированным кубам, фактическим значениям при принятых составе бетона и режиме центрифугирования.

Т а б л и ц а 2

Сравнение экспериментальных и теоретических нагрузок трещинообразования и разрушения для распорных узлов

Марка узла	Нагрузка трещинообразования			Разрушающая нагрузка		
	экспериментальная $N_{тр}^{оп}$, кН	теоретическая $N_{тр}^{теор}$, кН	расхождение, %	экспериментальная $N_{тр}^{оп}$, кН	теоретическая $N_{тр}^{теор}$, кН	расхождение, %
У1.1	1150	840	-36,9	1450	1730	+16,2
У1.2	2000	970	-105,8	2130	2280	+6,6
У1.3	1500	1200	-25,0	1750	1850	+5,4

Разрушение узлов с выпусками спиралей отличалось от разрушения распорных узлов появлением поперечных трещин по всему периметру сваи-оболочки в зоне расположения спиралей. Ширина раскрытия трещин при их обнаружении при нагрузках 90-93 % от разрушающей составляла 0,15-0,2 мм, после разрушения узла – 0,3-0,4 мм.

При изменении нагрузки от 0 до 1000-1250 кН смещение колонны относительно сваи-оболочки медленно возрастает от 0 до 0,1 мм. При дальнейшем увеличении нагрузки до значения, меньшего разрушающей на 1-2 ступени, происходит более быстрый рост смещения до 0,7 мм и наблюдается интенсивное смещение колонны.

Основные показатели свай-оболочек узлов с выпусками спиралей приведены в табл. 3.

Несущая способность узлов с выпусками спиралей выше несущей способности распорных узлов на некоторую величину, зависящую, как показал анализ экспериментов, прямо пропорционально от количества выпусков.

Работа выпусков спиралей аналогична работе закладной детали с анкерами, заделанными в бетон [7]. При смещении пробки относительно сваи-оболочки в выпусках арматуры от их удлинения возникают растягивающие усилия, прижимаю-

щие сваю-оболочку к пробке. Эти прижимающие силы являются необходимым условием появления сил трения, препятствующих перемещению пробки.

Т а б л и ц а 3

Основные показатели свай-оболочек узлов с выпусками спиралей

Марка узла	Толщина стенки стакана S , см	Сопротивление осевому растяжению бетона R_{pII} , МПа	Экспериментальная высота стенки H , см	Экспериментальная площадь поперечной арматуры F_x , см ²	Количество выпусков, K	Средняя величина выпуска, см
У2.1	8,3	1,97	99	8,4	42	2,7
У2.2	8,6	2,26	111	10,8	136	1,6
У2.3	8,4	2,33	109	9,6	115	1,8
У2.4	7,7	2,33	106	9,2	182	2,4
У2.5	7,7	2,68	108	9,6	237	3,5
У2.6	7,8	2,90	107	5,4	65	3,9
У2.7	7,4	2,69	106	5,4	65	8,5
У2.8	8,2	2,56	106	5,4	65	2,3
У2.9	9,1	2,67	108	5,4	65	3,4

Смещение пробки под действием вертикальной нагрузки приводит к появлению растягивающих усилий в выпусках спиралей и сил распора, вызывающих растягивающие напряжения в стенках сваи-оболочки. Можно предположить, что после достижения в выпусках спиралей напряжений, превышающих предел текучести, смещение пробки разрывает бетон стенок сваи-оболочки и все растягивающее усилие от сил распора воспринимает поперечная арматура сваи в зоне узла. При достижении и в поперечной арматуре сваи-оболочки напряжений, равных пределу текучести, диаметр сваи-оболочки увеличивается, и узел разрушается.

Расчет узлов с выпусками спиралей, по нашему мнению, следует производить по следующим формулам:

– по прочности

$$N - 2\mu K R_a^{\text{сп}} f_{\text{сп}} = 2\pi \mu R_a F_x;$$

– по трещинообразованию

$$N_{\text{тр}} - 2\mu K R_a^{\text{сп}} f_{\text{сп}} = 2\pi \mu R_{pII} (SH + 2nF_x),$$

где K – количество выпусков спиралей; R_a – расчетное сопротивление растяжению арматуры выпусков спиралей; $f_{\text{сп}}$ – площадь сечения одного стержня выпускаемой спирали.

Сравнение опытных и теоретических нагрузок трещинообразования и разрушения для узлов с выпусками спиралей приведено в табл. 4. Предложенные формулы имеют удовлетворительную сходимость, что подтверждает принятые расчетные предпосылки.

Основные размеры свай-оболочек с бетонной диафрагмой и результаты испытаний узлов приведены в табл. 5.

В узлах У3.2 и У3.4 при нагрузках соответственно 4750 кН и 4570 кН разрушились колонны. Характерным для испытанных узлов было появление в опорной части свай-оболочек продольных трещин при нагрузке 2750-2800 кН. В узлах У3.1 и У3.4 в зоне диафрагмы появились поперечные трещины по всему периметру сваи-оболочки, пересекаемые продольными трещинами. Разрушение узла У3.1 произошло вследствие раздавливания бетона сваи-оболочки в зоне диафрагмы. С наружной стороны сваи обнажился каркас ствола, осмотр которого показал, что поперечная арматура не порвалась, продольные стержни выгнулись. В этом случае на 72 % была реализована

максимальная несущая способность сваи-оболочки на центральное сжатие, равная 7200 кН.

Т а б л и ц а 4

Сравнение опытных и теоретических нагрузок трещинообразования и разрушения для узлов с выпусками спиралей

Марка узла	Нагрузка трещинообразования			Разрушающая нагрузка		
	экспериментальная $N_{тр}^{оп}$, кН	теоретическая $N_{тр}^{теор}$, кН	расхождение, %	экспериментальная $N_{тр}^{оп}$, кН	теоретическая $N_{тр}^{теор}$, кН	расхождение, %
У2.1	2000	1440	-38,9	2000	2430	+17,7
У2.2	3250	2730	-19,1	3480	4120	+15,5
У2.3	2250	2430	+7,4	2440	3310	+26,3
У2.4	3500	3080	-13,6	3750	4030	+6,9
У2.5	3750	3920	+4,3	4850	4740	-2,3
У2.6	2400	1920	-25,0	2400	2150	-11,6
У2.7	2000	1780	-12,0	2250	2150	-4,7
У2.8	1600	1910	+16,0	1600	1950	+19,2
У2.9	2000	2010	+0,5	2150	2150	0,0

Т а б л и ц а 5

Основные показатели узлов с диафрагмой

Марка узла	Толщина стенки опорной части сваи, см	Сопротивление осевому растяжению бетона, МПа	Размеры диафрагмы, см	Опытные нагрузки, кН	
				трещинообразования	разрушения
У3.1	8,3	2,33	48x400	2750	5180
У3.2	8,0	2,78	43x400	-	4750
У3.3	9,0	2,48	36x400	-	960
У3.4	9,2	2,79	23x190	2750	3500
У3.5	9,5	2,63	23x390	2800	4570

Анализ результатов экспериментов показывает, что уменьшение вылета диафрагмы в 2 раза в узле У3.5 по сравнению с У3.1 практически не сказалось на несущей способности узла, а уменьшение вылета и высоты диафрагмы в 2 раза в узле У3. 4 привело к снижению несущей способности в 1,5 раза. Диафрагмы с малым вылетом и большой высотой более технологичны в изготовлении.

В узле У3.3 была использована сборная пробка толщиной 500 мм, которая насухо и без замоноличивания устанавливалась на диафрагму. При нагружении пробка частично вдавилась в диафрагму и повернулась, что привело к внецентренному нагружению. Вследствие этого поперечная трещина образовалась на половине периметра сваи-оболочки. Целесообразно, наверное, в таких узлах использовать тонкий железобетонный поддон, устанавливаемый на диафрагму, монолитную бетонную пробку меньшей толщины, чем, например, в распорных узлах.

Свая-оболочка узла У4.1 для шпоночного соединения со свай-оболочкой была изготовлена с тремя кольцевыми пазами. Средняя глубина пазов 26 мм, высота 100 мм. При испытании узла У4.1 при нагрузке 2500 кН были обнаружены трещины в опорной части сваи-оболочки, при 4500 кН – в зоне пробки. При нагрузке 5400 кН опорная часть сваи-оболочки разрушилась. Трещины с максимальной шириной раскрытия 0,1 мм при нагрузке 5250 кН после сброса нагрузки имели ширину 0,05 мм.

Исходя из того что влияние пазов на сохранность свай-оболочки при забивке не изучено и изготовление подобных свай довольно сложно, по нашему мнению, более перспективны свай-оболочки с гофрированной внутренней поверхностью.

Выводы

Устройство кольцевой поперечной диафрагмы шпоночного соединения пробки со свайей практически без увеличения расхода материалов позволяет в 2-3 раза повысить несущую способность узлов по сравнению с распорными. Применение подобных узлов будет возможно после разработки технологии свай-оболочек с диафрагмой или с пазами.

Выпуски арматуры незначительно повышают металлоемкость и позволяют регулировать несущую способность узлов в широких пределах. Практическое внедрение узлов с выпусками спиралей не приводит к организационным и технологическим трудностям.

Разработанные методики расчета распорных узлов и узлов с выпусками спиралей обеспечивают необходимую сходимость с экспериментальными данными и могут использоваться при проектировании.

Список литературы

1. Патент на полезную модель RU 230921 U1. Портальное сооружение : опубл. 24.12.2024. Бюл. № 36 / Сабитов Л.С., Абдуллазянов Э.Ю., Айзатуллин М.М., Зарипов М.М., Ахтямова Л.Ш., Зинькова В.А., Зиятдинов С.Б., Набиуллина М.Ф.
2. Патент на полезную модель RU 230898 U1. Портальная опора : опубл. 24.12.2024. Бюл. № 36 / Сабитов Л.С., Абдуллазянов Э.Ю., Айзатуллин М.М., Зарипов М.М., Зиганшин А.Д., Зинькова В.А., Зиятдинов С.Ф., Чанчина В.Е.
3. Патент на полезную модель RU 230318 U1. Опора портального типа : опубл. 26.11.2024. Бюл. № 33 / Зинькова В.А., Абдуллазянов Э.Ю., Айзатуллин М.М., Адушкин К.Г., Зарипов М.М., Зиятдинов С.Б., Сабитов Л.С., Ахтямов А.Р.
4. Сабитов, Л.С. Разработка конструкций порталных сооружений и методики их испытания / Л.С. Сабитов, М.М. Айзатуллин, М.И. Ведяков, И.Р. Бадертдинов, С.Б. Зиятдинов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2025. – № 2.
5. Айзатуллин, М.М. Конструктивно-технологические особенности строительства порталных решетчатых опор / М.М. Айзатуллин, М.М. Зарипов, Л.С. Сабитов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3 (60). – С. 48–56.
6. Коломиец, В.С. Изыскания, проектирование и мониторинг железнодорожного пути и сооружений инновационными технологиями / В.С. Коломиец, В.Ю. Шемякин, С.А. Кудрявцев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2025. – № 1 (42). – С. 74–78.
7. Коломиец, В.С. Методические аспекты цифровых моделей геологического строения линейных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта методом обратного моделирования / В.С. Коломиец, С.А. Кудрявцев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2022. – № 3 (32). – С. 19–23.
8. Якшибаев, И.Н. Повышение работоспособности свайных фундаментов на многолетнемерзлых пучинистых грунтах / И.Н. Якшибаев, А.Н. Якшибаев, И.В. Недосеко, Д.Н. Кутляров, С.Ю. Самоходова // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – № 5 (145). – С. 63–74.
9. Якшибаев, И.Н. Оценка сравнительной эффективности свайных фундаментов зданий и сооружений в условиях Крайнего Севера / И.Н. Якшибаев, Л.С. Сабитов, Э.Ю. Абдуллазянов, Ц. Юйтун, Д.В. Метлицкая, И.В. Недосеко // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15, № 4.
10. Дымолазов, М.А. Выявление резервов несущей способности структурных конструкций / М.А. Дымолазов, Л.С. Сабитов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 1 (62). – С. 117–126.

11. Дымолазов, М.А. Решетчатые пространственные покрытия пониженной металлоемкости / М.А. Дымолазов, Л.С. Сабитов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 4 (61). – С. 116–127.

References

1. Utility model patent RU 230921 U1. A portal structure : published on 12/24/2024. Byul. No. 36 / Sabitov L.S., Abdullazyanov E.Yu., Aizatullin M.M., Zaripov M.M., Akhtyamova L.Sh., Zinkova V.A., Ziyatdinov S.B., Nabiullina M.F.
2. Utility model patent RU 230898 U1. Portal support : published on 12/24/2024. Bul. No. 36 / Sabitov L.S., Abdullazyanov E.Yu., Aizatullin M.M., Zaripov M.M., Ziganshin A.D., Zinkova V.A., Ziyatdinova S.F., Changchina V.E.
3. Utility model patent RU 230318 U1. A portal-type support : publ. 11/26/2024. Bul. No. 33. / Zinkova V.A., Abdullazyanov E.Yu., Aizatullin M.M., Adushkin K.G., Zaripov M.M., Ziyatdinov S.B., Sabitov L.S., Akhtyamov A.R.
4. Sabitov, L.S. Development of portal structures and methods of their testing / L.S. Sabitov, M.M. Ayzatullin, M.I. Vedyakov, I.R. Badertdinov, S.B. Ziyatdinov // Earthquake engineering. Constructions safety. – 2025. – No. 2.
5. Aizatullin, M.M. Constructive and technological features of the construction of portal lattice supports / M.M. Aizatullin, M.M. Zaripov, L.S. Sabitov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2024. – No. 3(60). – P. 48–56.
6. Kolomiets, V.S. Surveys, design and monitoring of railway tracks and structures using innovative technologies / V.S. Kolomiets, V.Yu. Shemyakin, S.A. Kudryavtsev // Transport of the Asia-Pacific Region. – 2025. – No. 1 (42). – P. 74–78.
7. Kolomiets, V.S. Methodological aspects of digital models of the geological structure of linear objects of railway transport infrastructure using the inverse modeling method / V.S. Kolomiets, S.A. Kudryavtsev // Transport of the Asia-Pacific Region. – 2022. – No. 3 (32). – P. 19–23.
8. Yakshibaev, I.N. Improving the performance of pile foundations on permafrost heaving soils / I.N. Yakshibaev, A.N. Yakshibaev, I.V. Nedoseko, D.N. Kutliyarov, S.Yu. Samokhodova // Problems of collection, preparation and transportation of oil and oil products. – 2023. – No. 5 (145). – P. 63–74.
9. Yakshibaev, I.N. Evaluation of comparative efficiency of pile foundations of buildings and structures in the Far North / I.N. Yakshibaev, L.S. Sabitov, E.Yu. Abdullazyanov, Ts. Yutong, D.V. Metlitskaya, I.V. Nedoseko // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. – 2023. – Vol. 15, No. 4.
10. Dymolazov, M.A. Identification of reserves of bearing capacity of structural structures / M.A. Dymolayov, L.S. Sabitov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 1 (62). – P. 117–126.
11. Dymolazov, M.A. Lattice spatial coverings of reduced metal consumption / M.A. Dymolazov, L.S. Sabitov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2024. – No. 4 (61). – P. 116–127.

УДК 004

DOI 10.54734/20722958_2025_3_121

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

Титова Елена Ивановна,
кандидат педагогических наук, доцент
кафедры «Математика и математическое
моделирование»

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 54-85-16

Акимова Ирина Викторовна,
кандидат педагогических наук, доцент
кафедры «Информатика и методика
обучения информатике и математике»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Titova Elena Ivanovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Mathematics and
Mathematical Modeling»

Penza State University, Pf.D
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
tel.: (8412) 54-85-16

Akimova Irina Victorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Informatics and Methods
of Teaching Science and Mathematics»

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Е.И. Титова, И.В. Акимова

Определена роль цифровых двойников на всех этапах жизненного цикла объекта строительства. Указаны основные цифровые технологии в разработке цифрового двойника здания. Создана собственная информационная система, реализующая функции цифрового двойника здания на этапе эксплуатации. В качестве языка разработки выбран Python на платформе framework FastAPI (одна из самых быстрых платформ для веб-приложений).

Ключевые слова: строительство, цифровые двойники, информационные технологии, языки программирования, веб-приложения

DIGITAL TWINS IN CONSTRUCTION

E.I. Titova, I.V. Akimova

The role of digital twins at all stages of the life cycle of a construction object is defined. The main digital technologies for the development of a digital twin of a building are highlighted. Its own information system has been created that implements the functions of a digital twin of the building at the operational stage. Python is chosen as the development language based on the FastAPI Framework (one of the fastest platforms for web applications).

Keywords: construction, digital twins, information technology, programming languages, web applications

В настоящее время в строительной индустрии особую роль играют реализации концепции цифровых двойников; за последние несколько лет они значительно эволюционировали и превратились в прорывную технологию. Нами цифровой двойник определяется не как простая виртуальная копия физического продукта, а как контекстуальная модель всей организации и ее функционирования; цифровой двойник фактически есть контекстуальная модель всей среды интеллектуального здания. Он объединяет ИТ-системы, датчики интернета вещей и данные сторонних производителей и дополняет их информацией о процессах и людях (динамическая цифровая копия, которую можно использовать для решения широкого спектра задач, представляет собой не просто цифровую копию физических объектов, а скорее сложную модель взаимодействия с окружающей средой).

Нами цифровой двойник рассматривается как сложная виртуальная копия физического объекта или системы, тщательно разработанная для имитации их поведения и характеристик в реальном мире. В строительстве цифровые двойники яв-

ляются важными инструментами, позволяющими создавать комплексные виртуальные модели, охватывающие сложные детали здания или сооружения.

По ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» дано определение цифрового двойника, порядок разработки цифровых двойников, типовые требования к структуре, порядку их сопровождения. Стандарт разработан с учетом потребностей машиностроения, но может быть применен и для строительной отрасли [1].

Цифровой двойник в строительстве может иметь различный уровень сложности. Самый простой цифровой двойник представляется как упрощенная модель, которая только считывает показания с датчиков и управляет инженерными системами объекта, в целом. Цифровые двойники наряду с Internet of Things (интернет вещей) открывают огромные возможности для преобразования существующей парадигмы управления городами – они выступают основой «умных» городов.

Далее рассмотрим роль цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла строительного проекта.

Жизненный цикл строительного проекта охватывает несколько этапов, начиная от концепции проекта и до его завершения и эксплуатации. Роль цифровых двойников на всех этапах жизненного цикла объекта строительства показана в ряде исследований. Так, у С. Esteman, М.А. Чегодаевой [8] определяется высокая роль цифровых технологий для стадии эксплуатации объекта строительства (рис. 1).

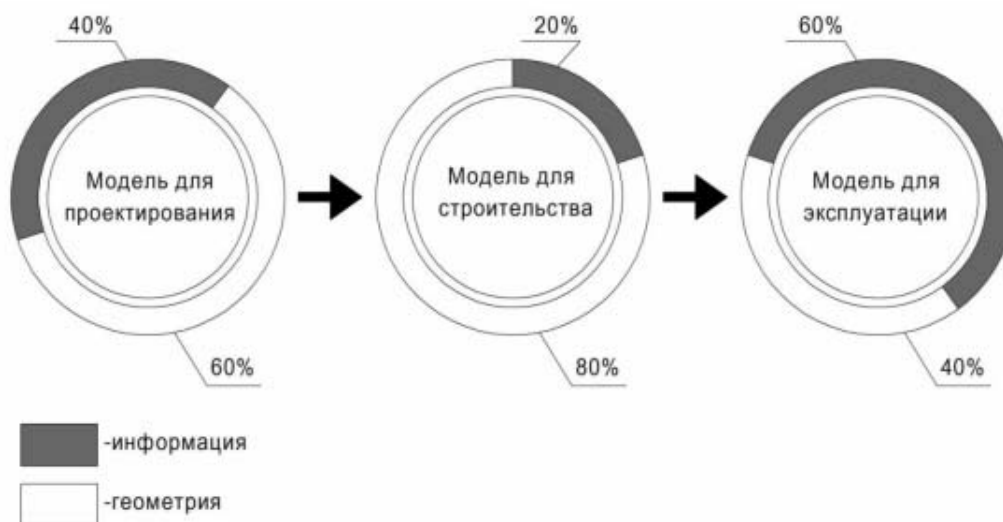


Рис. 1. Информационные модели на различных этапах жизненного цикла

Стадия эксплуатации выводит информационную составляющую на передний план (ранее предполагалось, что только первые этапы, связанные с проектированием объекта строительства, связаны с цифровыми технологиями). Этап эксплуатации имеет наиболее длительный временной срок (иногда до десятков лет). Трудовые и финансовые затраты этого периода суммарно могут превысить затраты предыдущих этапов. Поэтому использование цифровых технологий, в том числе, цифровых двойников, должны широко применяться и на данном этапе. В качестве цифровых технологий данного этапа выделяются:

- управление эксплуатационной документацией;
- контроль расходования ресурсов;
- отложенная эксплуатация инженерной и информационной инфраструктуры;
- интеграция с BMS-системой объекта;
- учет оборудования и гарантийных обязательств;
- оценка эффективности управления, инвентаризация и технический аудит оборудования.

Не потеряна актуальность разработки собственной информационной системы, реализующей функции цифрового двойника здания на именно на этапе эксплуатации (на рынке программного обеспечения представлено недостаточно).

При разработке используется язык Python, а конкретно framework FastAPI. Он реализует спецификацию ASGI (Asynchronous Server Gateway Interface). FastAPI – относительно молодая платформа. Предлагаемая к разработке система рассматривает такие объекты, как здание, квартира, управляющая компания. В данном приложении описаны основные показатели здания, которое выступает объектом управления:

- основные параметры здания;
- параметры для каждой квартиры в здании;
- основные характеристики управляющей компании (при наличии);
- результаты текущей проверки от управляющей компании.

Ниже представлен фрагмент программы, в котором с помощью SQLAlchemy Expression Language, описана схема базы данных. Таблицы в SQLAlchemy представлены в виде экземпляров класса Table. Его конструктор принимает название таблицы, метаданные и одну или несколько колонок.

Листинг 1

```
import sqlalchemy
from config import metadata
from datetime import datetime
buildings = sqlalchemy.Table(
    "buildings",
    metadata,
    sqlalchemy.Column("id", sqlalchemy.Integer, primary_key=True),
    sqlalchemy.Column("title", sqlalchemy.String(100), unique=True),
    sqlalchemy.Column("material", sqlalchemy.Text),
    sqlalchemy.Column("length", sqlalchemy.Text),
    sqlalchemy.Column("width", sqlalchemy.Text),
    sqlalchemy.Column("height", sqlalchemy.Text),
    sqlalchemy.Column("geo", sqlalchemy.Text),
    sqlalchemy.Column("number_f", sqlalchemy.Text),
    sqlalchemy.Column("entrances", sqlalchemy.Text),
    sqlalchemy.Column("basement", sqlalchemy.Boolean),
    sqlalchemy.Column("square", sqlalchemy.Text),
    sqlalchemy.Column("n_flats", sqlalchemy.Text),
    sqlalchemy.Column("n_owners", sqlalchemy.Text),
    sqlalchemy.Column("created", sqlalchemy.DateTime,
        default=datetime.utcnow().strftime("%Y-%m-%d" " %H: %M: %S")),
    sqlalchemy.Column("modified", sqlalchemy.DateTime,
        default=datetime.utcnow().strftime("%Y-%m-%d" " %H: %M: %S"))
```

Вид разработанной системы представлен на рис.2-4.

Сервис Про Главная Документация О сервисе Выйти							
id- объекта	Название	Материал	Ширина	Длина	Высота	Гео- данные	Этажност
1	Созвездие	Кирпич	26.16	25.90	58.62	53.138673 45.859433	17

Общие характеристики
План этажа

Рис. 2. Вид приложения

Сервис Про Главная Документация О сервисе Выйти

id-объекта	Название	Материал	Ширина	Длина	Высота	Гео-данные	Этажность	Количество подъездов	Подвальное помеще
1	Созвездие	Кирпич	26.16	25.90	58.62	53.138673 45.859433	17	1	☒

Общие характеристики План этажа

План этажа объекта

1

Рис. 3. Вид приложения

Сервис Про Главная Документация О сервисе Выйти

id-объекта	Название	Материал	Ширина	Длина	Высота	Гео-данные	Этажность	Количество подъездов	Подвальное помещение
1	Созвездие	Кирпич	26.16	25.90	58.62	53.138673 45.859433	17	1	☒

Общие характеристики План этажа

План этажа объекта

1

Рис. 4. Вид приложения

Разработанное авторами приложение работает в режиме онлайн, предполагает выполнение функций управления объектом строительства (жилым домом) на этапе эксплуатации. В результате вводится в работу цифровой двойник здания, который может быть использован, например, в работе управляющей компании.

В результате проведенного исследования были получены следующие выводы.

1. Цифровые двойники позволяют выполнять управление зданием в цифровом режиме и вносить нужные исправления и корректировки до момента самого строительства, что экономически выгоднее и сокращает временные рамки. Строительные компании высоко оценивают нужность разработки цифрового двойника и с успехом используют их в своей работе на всех этапах эксплуатации здания.

2. В качестве решения актуальной проблемы предлагается разработка информационной системы, реализующей функции цифрового двойника здания именно на этапе эксплуатации. В качестве средства разработки был выбран язык программирования Python. Разработанное приложение работает в режиме онлайн, предполагает выполнение функций управления жилым домом на этапе эксплуатации.

Список литературы

1. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. – URL: <http://gost.gtsever.ru/Data/758/75810.pdf> (дата обращения 20.08.2024).
2. Акимова, И.В. Создание электронного учебника модульной структуры курса математики / И.В. Акимова, Е.И. Титова, В.А. Буркина // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – №3. – С.15–19.
3. Акимова, И.В. Использование современных цифровых технологий в решении математических задач строительного профиля / И.В. Акимова, Е.И. Титова // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – №5 (часть2). – С.261–268.
4. Будылина, Е.А. Системные исследования в материаловедении / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №4(49). – С.48–53.
5. Гарькин, И.Н. Из опыта экспертизы зданий и сооружений в условиях Крайнего Севера / И.Н. Гарькин, И.А. Гарькина, С.В. Ключев, Д.С. Саденко // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №4(53). – С.66–74.
6. Титова, Е.И. Регрессионные методы в строительном материаловедении: компьютерная реализация / Е.И. Титова, Ю.Н. Волчкова // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2020. – №1(10). – С.18–22.
7. Титова, Е.И. Многослойные конструкции утепления: программное обеспечение / Е.И. Титова, И.В. Акимова // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №4(57). – С.143–148.
8. Чегодаева, М.А. Функциональность информационной модели на этапах проектирования, строительства и эксплуатации / М.А. Чегодаева // Молодой ученый. – 2016. – №25. – С. 102–105. – URL: <https://moluch.ru/archive/129/35716/> (дата обращения: 23.05.2024).

References

1. GOST R 57700.37-2021. Computer models and modeling. – URL: <http://gost.gtsever.ru/Data/758/75810.pdf> (date of appeal 08/20/2024).
2. Akimov, I. V. Creation of electronic textbook of modular structure of mathematics course / I. V. Akimov, E. I. Titova, V. A. Burkina // Modern science-intensive technologies. – 2015. – No. 3. – P. 15–19.
3. Akimova, I.V. The use of modern digital technologies in solving mathematical problems of the construction profile / I.V. Akimova, E.I. Titova // Modern high-tech technologies. – 2022. – No. 5 (part2). – P. 261–268.
4. Budylyna, E.A. System research in materials science / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – №4(49). – P.48–53.
5. Garkin, I.N. From the experience of examination of buildings and structures in the conditions of the Far North / I.N. Garkin, I.A. Garkina, S.V. Klyuev, D.S. Sadenko // Regional architecture and engineering. – 2022. – №4(53). – 2022. – P.66–74.
6. Titova, E.I. Regression methods in building materials science: computer implementation / E.I. Titova, Y.N. Volchkova // Bulletin of PGUAS: construction, science and education. – 2020. – №1(10). – P.18–22.
7. Titova, E. I. Multilayer insulation structures: software / E. I. Titova, I. V. Akimov // Regional architecture and engineering. – №4(57). – 2023. – P.143–148.
8. Chegodaeva, M.A. Functionality of the information model at the stages of design, construction and operation / M.A. Chegodaeva // The young scientist. – 2016. – №25. – P. 102–105. – URL: <https://moluch.ru/archive/129/35716/> (date of appeal: 23.05.2024).

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 697.7

DOI 10.54734/20722958_2025_3_126

*Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет*
Россия, 603950, г. Нижний Новгород,
ул. Ильинская, д. 65,
тел. +7 (831) 430-54-85

Бодров Михаил Валерьевич,
доктор технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Отопление и вентиляция»
E-mail: tes84@inbox.ru

Руин Алексей Евгеньевич,
ассистент кафедры «Отопление
и вентиляция»
E-mail: ruin199920@yandex.ru

Смыков Александр Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Отопление и вентиляция»
E-mail: uprnauki@gmail.com

*Nizhny Novgorod State University of
Architecture and Civil Engineering*
Russia, 603950, Nizhny Novgorod,
65, Il'inskaya St.,
tel. +7 (831) 430-54-85

Bodrov Mihail Valer'evich,
Doctor of Sciences, Associate Professor, Head
of the Department «Heating and Ventilation»
E-mail: tes84@inbox.ru

Ruin Aleksey Evgen'evich,
Assistant of the Department «Heating and
Ventilation»
E-mail: ruin199920@yandex.ru

Smykov Aleksandr Anatol'evich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Heating and Ventilation»
E-mail: uprnauki@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ВОДЯНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

М. В. Бодров, А.Е. Руин, А.А. Смыков

Представлены результаты исследования плотности теплового потока излучающих профилей системы лучистого отопления с промежуточным теплоносителем относительно их расположения от облучаемой поверхности. Применение низкотемпературных систем лучистого отопления в животноводческих зданиях по сравнению с газовыми системами позволяет снизить вероятность появления зон «затенения» за счет меньшей мощности. Зоны «затенения» приводят к возникновению температурных контрастов и создают условия для простудных заболеваний.

Ключевые слова: водяное отопление, теплофизика, энергосбережение, энергоэффективность, лучистое отопление, инфракрасное излучение, излучающий профиль, животноводческие здания

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT FLOW DENSITY OF WATER INFRARED RADIATORS

М. V. Bodrov, A.E. Ruin, A.A. Smykov

The results of the study of heat flux density of radiating profiles of a radiant heating system with an intermediate heat carrier relative to their location from the irradiated surface are presented. The use of low-temperature radiant heating systems in livestock buildings reduces the probability of «shading» zones due to lower power compared with gas systems. The «shading» zones lead to temperature contrasts and create conditions for colds.

Keywords: water heating, thermophysics, energy saving, energy efficiency, radiant heating, infrared radiation, radiant profile, residential buildings

Введение. В настоящее время системы лучистого отопления являются самым перспективным видом обогрева помещений [1, 2, 3]. Источниками теплоты в этих системах могут быть электричество, теплота от сгорания газового топлива, а также вода. Минусами электрических систем лучистого отопления являются их пожароопасность и высокая стоимость электроэнергии. Газовые же системы выигрывают за счет меньшей стоимости газового топлива, но их применение ограничивается доступностью газа, категорией пожароопасности обслуживаемых помещений и значительными капитальными затратами [4]. Более безопасными и доступными в использовании являются системы лучистого отопления с промежуточным теплоносителем. Теплоносителем в этих системах служат различные жидкости: перегретая вода (до 150 °С), различные антифризы [5]. Принципиальным отличием систем лучистого отопления от традиционных конвективных является то, что нагревательные элементы системы за счет инфракрасного излучения передают теплоту окружающим поверхностям обслуживаемого помещения, которые, в свою очередь, абсорбируют теплоту в приповерхностном слое. На нагретых поверхностях образуются конвективные потоки, которые и обогревают обслуживаемое помещение [6, 7, 8].

Материалы и методы. Исследования плотности теплового потока водяных инфракрасных излучающих профилей проводились авторами в лаборатории лучистого отопления УНИЦ «СОНИИ» на базе ФГБОУ ВО «ННГАСУ». Лаборатория оснащена уникальной базой контрольно-измерительных приборов, которые в полном объеме закрывают потребность в измерении всех необходимых для изучения параметров микроклимата зданий и отдельных помещений: температуры внутреннего воздуха; температуры, давления и расхода теплоносителя; теплового потока инфракрасного излучателя; температуры внутренней поверхности ограждающих конструкций [9, 10, 11].

Исследуемый образец представляет собой металлический профиль уникальной геометрической формы поперечного сечения, благодаря которой доля лучистой составляющей теплопередачи значительно возрастает. Рассматриваемый излучающий профиль отливается из анодированного сплава алюминия AlMgSi0.5, благодаря этому профиль имеет значительную устойчивость к коррозии, обладает высокой прочностью материала и способен работать при достаточно высоких температурах теплоносителя.

Общий вид лабораторной установки систем лучистого отопления с промежуточным теплоносителем и излучающего профиля Flower 225, предоставленного промышленным партнером НННГАСУ ООО «Флайг+Хоммель» [12], приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид лабораторной установки систем лучистого отопления с промежуточным теплоносителем (слева) и излучающего профиля Flower 225 (справа)

Целью исследований, проводимых авторами с 2022 г. по настоящее время, является определение всех основных теплотехнических характеристик (фактическая теплоотдача 1 п.м. инфракрасного излучателя при отличающихся от нормальных условий температурном напоре ΔT и массовом расходе $M_{\text{изл}}$, удельная плотность теплового потока, выбор оптимального размещения инфракрасного излучателя в отапливаемом помещении) водяных инфракрасных излучателей, необходимых для

создания методической базы для расчета, проектирования, монтажа и эксплуатации водяных систем лучистого отопления с промежуточным теплоносителем в зданиях и сооружениях различного назначения.

Результаты исследований. Измерение плотности потока лучистой тепловой энергии от водяного инфракрасного излучателя на различном расстоянии до облучаемой поверхности проводилось с использованием цифрового неселективного радиометра «Аргус-03», координаты точек измерения определялись с помощью лазерного дальномера марки Bosch GLM 50 C. Измеряемыми величинами являлись:

T_1 – температура теплоносителя в подающем трубопроводе экспериментальной установки, °C;

$\tau_{\text{изл}}$ – температура поверхности излучателя, °C;

l_x – расстояние от поверхности излучателя до точки измерения, м;

φ_x – угол между нормалью излучателя и плоскостью измерения, град;

$q_{\text{изл}}$ – плотность лучистого теплового потока, Вт/м².

Результаты проведенных исследований по определению плотности потока лучистой тепловой энергии для излучателя марки Flower 225, прошедшие первичную математическую обработку, представлены в таблице и на рис. 2.

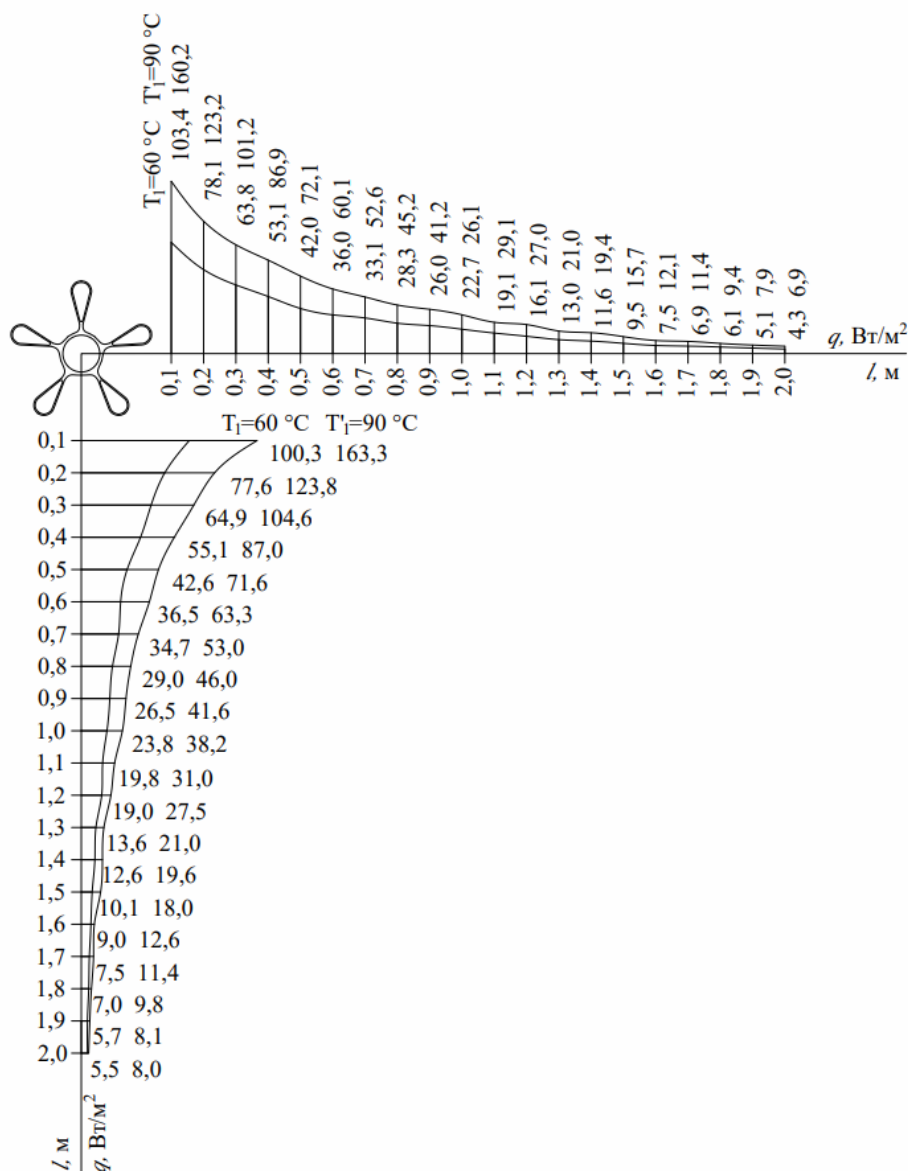


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований плотности теплового потока излучателя марки Flower 225

Экспериментальное измерение плотности потока тепловой энергии для Flower 225

№ п/п опыта	l_x , м	$q_{изл}$, Вт/м ²			
		$T_1 = 60\text{ °C}; \tau_{изл} = 59,6\text{ °C}$		$T_1' = 90\text{ °C}; \tau_{изл} = 88,5\text{ °C}$	
		$\varphi_x = 0^\circ$	$\varphi_x = 90^\circ$	$\varphi_x = 0^\circ$	$\varphi_x = 90^\circ$
1	0,1	100,32	103,45	163,3	160,25
2	0,2	77,56	78,12	123,85	123,22
3	0,3	64,89	63,85	104,56	101,2
4	0,4	55,06	53,11	87,00	86,95
5	0,5	42,59	41,96	71,60	72,10
6	0,6	36,55	36,01	63,27	60,12
7	0,7	34,69	33,14	53,01	52,65
8	0,8	28,98	28,26	45,96	45,16
9	0,9	26,53	26,02	41,56	41,23
10	1,0	23,85	22,68	38,22	36,10
11	1,1	19,83	19,10	31,01	29,12
12	1,2	18,98	16,12	27,53	27,01
13	1,3	13,58	12,96	21,03	20,96
14	1,4	12,63	11,65	19,65	19,43
15	1,5	10,11	9,54	17,99	15,75
16	1,6	8,99	7,55	12,59	12,16
17	1,7	7,51	6,93	11,45	11,38
18	1,8	6,96	6,12	9,78	9,45
19	1,9	5,67	5,12	8,15	7,92
20	2,0	5,53	4,28	7,98	6,87

Выводы по эксперименту. Впервые получены объективные данные по лучистым характеристикам водяного инфракрасного излучателя – излучающего профиля марки Flower 225, а именно интенсивность теплового потока на облучаемую исследуемую поверхность при разной удаленности излучающего профиля. Данные могут быть использованы при расчете и проектировании систем отопления с промежуточным теплоносителем на базе исследуемых инфракрасных излучателей.

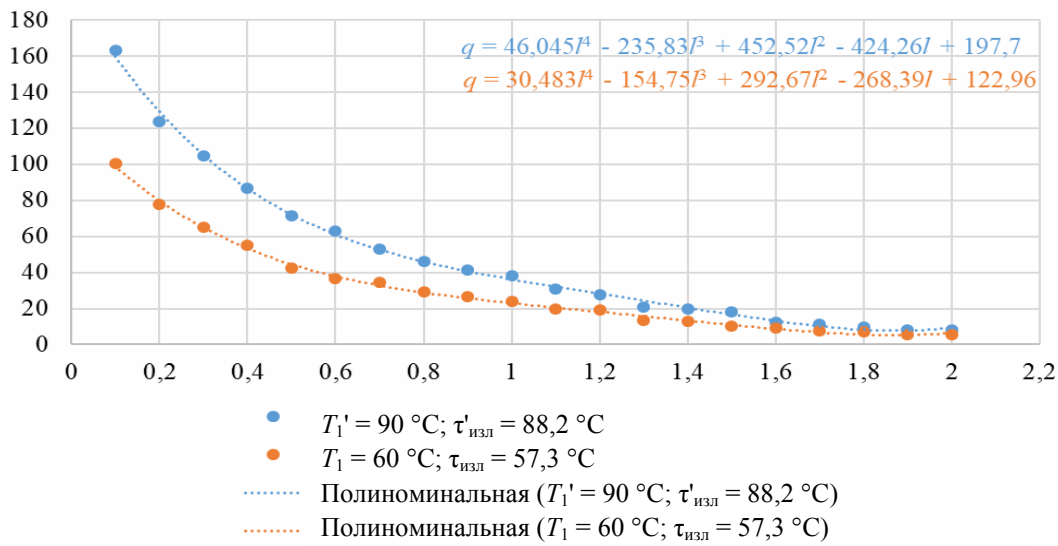
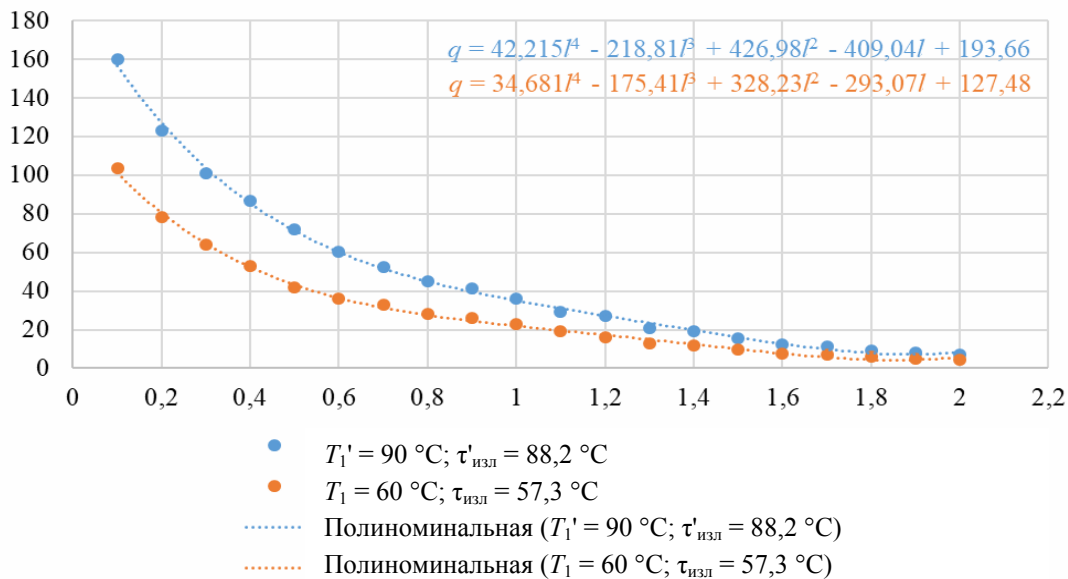
Целью математической обработки результатов исследования является построение регрессионных зависимостей, позволяющих определять теплотехнические параметры не только при исследованных значениях температурного напора, но и при любых других возможных значениях [13].

Для определения зависимостей, характеризующих кривые изменения плотности лучистого теплового потока (эпюра лучистой теплоты), была проведена математическая обработка результатов эксперимента (см. таблицу) в программном комплексе MathCAD. Были получены полиномиальные уравнения четвертой степени для кривых плотности лучистого теплового потока при разных параметрах излучателя (рис. 3, 4).

При проектировании систем лучистого отопления необходимо учитывать максимальное значение интенсивности облучения для данной высоты подвеса инфракрасных излучателей [14, 15], которое не должно превышать допустимой интенсивности облучения с учетом взаимного облучения n количеством инфракрасных излучателей [16].

Согласно [17], итоговое значение интенсивности облучения поверхности $q_{изл.\Sigma}$, Вт/м², определяется суммированием поверхностной плотности облучения $q_{изл.i}$, Вт/м², n рядом расположенных инфракрасных излучателей:

$$q_{изл.\Sigma} = \sum_{i=1}^n q_{изл.i} \quad (1)$$

Рис. 3. Кривые плотности лучистого теплового потока для излучателя Flower 225 (при $\varphi_x = 0^\circ$)Рис. 4. Кривые плотности лучистого теплового потока для излучателя Flower 225 (при $\varphi_x = 90^\circ$)

Для представления картины распределения интенсивности теплового потока от инфракрасных излучателей на различной высоте от облучаемой поверхности и различном расстоянии от смежных инфракрасных излучателей необходимо построить эпюры облучения излучателей Flower 225. Эпюры строятся согласно полученным экспериментальным данным, приведенным выше.

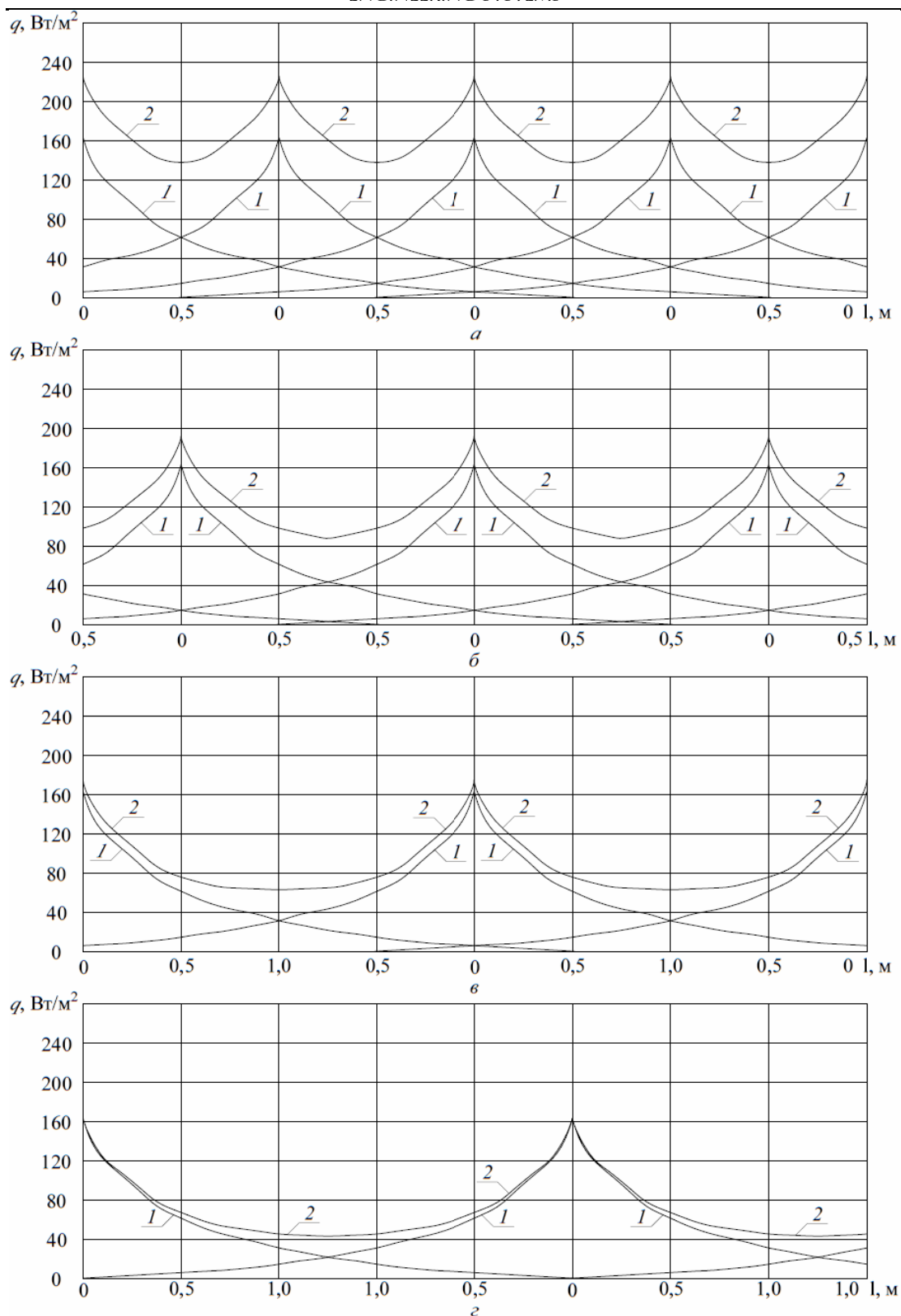


Рис. 5. Эпюры суммарного облучения поверхности излучающим профилем Flower 225:

а – шаг между излучателями $l = 1,0 \text{ м}$; б – шаг между излучателями $l = 1,5 \text{ м}$;

в – шаг между излучателями $l = 2,0 \text{ м}$; г – шаг между излучателями $l = 2,5 \text{ м}$;

1 – эпюры облучения одиночных излучателей;

2 – суммарная поверхностная плотность энергии

Полученные эпюры облучения могут быть применены в расчете систем лучистого отопления путем определения оптимального расположения инфракрасных излучателей как по высоте до облучаемой поверхности, так и по расстоянию между самими излучателями, что позволит при необходимости на поверхности пола, стен, обогреваемого оборудования, материалов, изготовленной продукции, поверхности тела человека и животных создать любое заданное значение плотности теплового потока. Это говорит о высоком потенциале использования этих систем в различных промышленных зданиях для обеспечения требуемых параметров микроклимата в рабочей зоне. Применение низкотемпературных систем лучистого отопления на сельскохозяйственных объектах позволяет уйти от формирования неравномерных температурных полей зон лучистого теплообмена, которые ведут к образованию температурных контрастов, что негативно сказывается на здоровье животных, увеличивая процент падежа и ухудшая качество выпускаемой продукции. Применение водяных низкотемпературных систем отопления исключает возникновение неравномерных температурных полей, в результате улучшается комфортность микроклимата мест обитания животных. За счет лучистого теплообмена поверхности животных и подстилки всегда остаются сухими, что исключает риск возникновения инфекционных заболеваний.

Список литературы

1. Бодров, М.В. Исследование теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей для энергоэффективных систем лучистого отопления / М.В. Бодров, Д.А. Кузнецов, А.А. Смыков, А.Е. Руин // Академия. Архитектура и строительство. – 2023. – № 2. – С. 160–167.
2. Rhee, K.N. A 50 Year Review of Basic and Applied Research in Radiant Heating and Cooling Systems for the Built Environment / K.N. Rhee, K.W. Kim. – DOI:10.1016/j.buildenv.2015.03.040 // Building and Environment. – 2015. – № 91. – P. 166–190.
3. Rhee, K.N. Ten Questions about Radiant Heating and Cooling Systems / K.N. Rhee, B.W. Olesen, K.W. Kim. – DOI:10.1016/j.buildenv.2016.11.030 // Building and Environment. – 2017. – № 112. – P. 367–381.
4. Dudkiewicz, E. The Influence of Orientation of a Gas-Fired Direct Radiant Heater on Radiant Temperature Distribution at a Work Station / E. Dudkiewicz, J. Jezowiecki. – DOI:10.1016/j.enbuild.2010.12.030 // Energy and Buildings. – 2011. – № 43(6). – P. 1222–1230.
5. Jia, H. Experimentally-Determined Characteristics of Radiant Systems for Office Buildings / H. Jia, X. Pang, P. Haves. – DOI:10.1016/j.apenergy.2018.03.121 // Applied Energy. – 2018. – № 221. – P. 41–54.
6. Fonseca, N. Radiant Ceiling Systems Coupled to Its Environment. Part 1: Experimental analysis / N. Fonseca, C. Cuevas, V. Lemort. – DOI:10.1016/j.applthermaleng.2010.05.033 // Applied Thermal Engineering. – 2010. – № 14–15 (30). – P. 2187–2195.
7. Fonseca, N. Radiant Ceiling Systems Coupled to Its Environment. Part 2: Dynamic Modeling and Validation / N. Fonseca, S. Bertagnolio, C. Cuevas. – DOI:10.1016/j.applthermaleng.2010.05.032 // Applied Thermal Engineering. – 2010. – № 14–15(30). – P. 2196–2203.
8. Fonseca, N. Experimental Analysis and Modeling of Hydronic Radiant Ceiling Panels Using Transient-State Analysis / N. Fonseca. – DOI:10.1016/j.ijrefrig.2011.01.007 // International Journal of Refrigeration. – 2011. – № 4 (34). – P. 958–967.
9. Смыков, А.А. Испытания лабораторной модели лучистой системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / М.В. Бодров, А.А. Смыков // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2023. – № 3. – С. 40–41.

10. Energy Efficiency of Radiant Heating Systems Based on Water-Based Radiant Profiles / M. Bodrov, A. Smykov, M. Morozov [et al.] // *Civil Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 9, № 5. – P. 1546–1557.
11. Bojić, M. Performances of Low Temperature Radiant Heating Systems / M. Bojić, D. Cvetković, V. Marjanović, M. Blagojević, Z. Djordjević. – DOI:10.1016/j.enbuild.2013.02.033. // *Energy and Buildings*. – 2013. – № 61. – P. 233–238.
12. Патент 2021500360 Российская Федерация. Промышленный образец № 126310 / Кузнецов Д. опубли. 09.07.2021. – URL: <https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=61e91125c0a01c49689cf2e1dd0110b1> (дата обращения: 07.04.2025).
13. Experimental Investigation on the Heat Transfer Performance and Water Condensation Phenomenon of Radiant Cooling Panels / Y.L. Yin, R.Z. Wang, X.Q. Zhai, T.F. Ishugah. – DOI:10.1016/j.buildenv.2013.09.016. // *Building and Environment*. – 2014. – № 71. – P. 15–23.
14. Родин, А.К. Газовое лучистое отопление / А.К. Родин. – Ленинград : Недра, 1987. – 191 с.
15. Брюханов, О.Н. Радиационный газовый нагрев / О.Н. Брюханов, Э.В. Крайний, Б.С. Матрюков. – Ленинград : Недра, 1989. – 296 с.
16. Imanari, T. Thermal Comfort and Energy Consumption of the Radiant Ceiling Panel System. Comparison with the Conventional All-Air System / T. Imanari, T. Omori, K. Bogaki. – DOI:10.1016/S0378-7788(98)00084-X. // *Energy and Buildings*. – 1999. – № 30(2). – P. 167–175.
17. Бодров, В.И. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха производственных зданий сельхозназначения / В.И. Бодров, Л.М. Махов, Е.В. Троицкая. – Москва : АСВ, 2014. – 240 с.

References

1. Bodrov, M.V. Investigation of thermal engineering characteristics of water infrared radiators for energy-efficient radiant heating systems / M.V. Bodrov, D.A. Kuznecov, A.A. Smykov, A.E. Ruin // *Academy. Architecture and Construction*. – 2023. – № 2. – P. 160–167.
2. Rhee, K.N. A 50 Year Review of Basic and Applied Research in Radiant Heating and Cooling Systems for the Built Environment / K.N. Rhee, K.W. Kim. – DOI:10.1016/j.buildenv.2015.03.040 // *Building and Environment*. – 2015. – № 91. – P. 166–190.
3. Rhee, K.N. Ten Questions about Radiant Heating and Cooling Systems / K.N. Rhee, B.W. Olesen, K.W. Kim. – DOI:10.1016/j.buildenv.2016.11.030 // *Building and Environment*. – 2017. – № 112. – P. 367–381.
4. Dudkiewicz, E. The Influence of Orientation of a Gas-Fired Direct Radiant Heater on Radiant Temperature Distribution at a Work Station / E. Dudkiewicz, J. Jezowiecki. – DOI:10.1016/j.enbuild.2010.12.030 // *Energy and Buildings*. – 2011. – № 43(6). – P. 1222–1230.
5. Jia, H. Experimentally-Determined Characteristics of Radiant Systems for Office Buildings / H. Jia, X. Pang, P. Haves. – DOI:10.1016/j.apenergy.2018.03.121 // *Applied Energy*. – 2018. – № 221. – P. 41–54.
6. Fonseca, N. Radiant Ceiling Systems Coupled to Its Environment. Part 1: Experimental analysis / N. Fonseca, C. Cuevas, V. Lemort. – DOI:10.1016/j.applthermaleng.2010.05.033 // *Applied Thermal Engineering*. – 2010. – № 14–15 (30). – P. 2187–2195.
7. Fonseca, N. Radiant Ceiling Systems Coupled to Its Environment. Part 2: Dynamic Modeling and Validation / N. Fonseca, S. Bertagnolio, C. Cuevas. – DOI:10.1016/j.applthermaleng.2010.05.032 // *Applied Thermal Engineering*. – 2010. – № 14–15(30). – P. 2196–2203.

8. Fonseca, N. Experimental Analysis and Modeling of Hydronic Radiant Ceiling Panels Using Transient-State Analysis / N. Fonseca. – DOI:10.1016/j.ijrefrig.2011.01.007 // International Journal of Refrigeration. – 2011. – № 4 (34). – P. 958–967.
9. Smykov, A.A. Tests of a laboratory model of a radiant heating system based on water infrared radiators / A.A. Smykov, M.V. Bodrov // Plumbing, Heating, Air conditioning. – 2023. – № 3. – P. 40–41.
10. Energy Efficiency of Radiant Heating Systems Based on Water-Based Radiant Profiles / M. Bodrov, A. Smykov, M. Morozov [et al.]. // Civil Engineering Journal. – 2021. – Vol. 9, № 5. – P. 1546–1557.
11. Bojić, M. Performances of Low Temperature Radiant Heating Systems / M. Bojić, D. Cvetković, V. Marjanović, M. Blagojević, Z. Djordjević. – DOI:10.1016/j.enbuild.2013.02.033 // Energy and Buildings. – 2013. – № 61. – P. 233–238.
12. Patent 2021500360 Russian Federation. Industrial design №126310 / Kuznetsov D. publ. 07/09/2021. – URL: [http:// https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=61e91125c0a01c49689cf2e1dd0110b1](http://https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=61e91125c0a01c49689cf2e1dd0110b1) (Accessed 03/07/23).
13. Experimental Investigation on the Heat Transfer Performance and Water Condensation Phenomenon of Radiant Cooling Panels / Y.L. Yin, R.Z. Wang, X.Q. Zhai, T.F. Ishugah. – DOI:10.1016/j.buildenv.2013.09.016 // Building and Environment. – 2014. – № 71. – P. 15–23.
14. Rodin, A.K. Gas radiant heating / A.K. Rodin. – Leningrad : Nedra, 1987. – 191 p.
15. Bryuhanov, O.N. Radiation gas heating / O.N. Bryuhanov, E.V. Krajnii, B.S. Mastryukov. – Leningrad : Nedra, 1989. – 296 p.
16. Imanari, T. Thermal Comfort and Energy Consumption of the Radiant Ceiling Panel System. Comparison with the Conventional All-Air System / T. Imanari, T. Omori, K. Bogaki. – DOI:10.1016/S0378-7788(98)00084-X // Energy and Buildings. – 1999. – № 30(2). – P. 167–175.
17. Bodrov, V.I. Heating, ventilation and air conditioning of agricultural production buildings / V. I. Bodrov. L.M. Makhov. E.V. Troitskaya. – Moscow : ASV. 2014. – 240 p.

УДК 698.697.92

DOI 10.54734/20722958_2025_3_135

*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**Ерёмкин Александр Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru**Чудайкина Татьяна Николаевна,**
кандидат экономических наук, доцент
кафедры «Экономика, организация
и управление производством»
E-mail: chudajkina-tn@list.ru**Мишин Андрей Алексеевич,**
аспирант кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru*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**Eremkin Aleksander Ivanovich,**
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Heat, Gas Supply
and Ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru**Chudaykina Tatyana Nikolaevna,**
Candidate of Sciences, Assistant Professor of
the department «Economy, Organization and
Management of Production»
E-mail: chudajkina-tn@list.ru**Mishin Andrey Alekseevich,**
Graduate student of the department «Heat
and Ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru*Penza State university*
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay 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

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В КУЛЬТОВЫХ ПРАВОСЛАВНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, Т.Н. Чудайкина, А.А. Мишин

Актуальность исследования связана с сохранением историко-культурного наследия в культовых православных сооружениях. При сжигании церковных свечей, масла в лампадах выделяются копоть, сажа, растительный жир, влага и т.п., оседающие на убранстве, что наносит ему непоправимый ущерб. Для придания убранству прежнего привлекательного вида и отсрочки старения требуются значительные затраты на реставрационные работы и поддержание внутреннего микроклимата. Установлено, что воздух, загрязненный продуктами горения свечей, тепловыми потоками от нагретой поверхности, переносится в объем помещения. Одним из источников нагретой поверхности в зале богослужения являются отопительные приборы, образующие конвективные потоки, а также теплота от пламени горящих свечей. Авторами разработано техническое устройство, устанавливаемое над отопительным прибором, в виде горизонтальной направляющей с профилем внутри в виде дуги для обеспечения отклонения загрязненного конвективного потока от стены внутрь помещения. Доказано, что применяемое устройство обеспечивает устойчивое отклонение загрязненного потока от стены и размещенного на ее поверхности убранства. Также разработано техническое устройство в виде подсвечника с зонтом для улавливания и удаления копоти, сажи, влаги, растительного жира в местах их образования. Это позволяет сохранить историко-культурное наследие и сократить затраты на реставрационные работы. Авторами предложена методика оценки экономической эффективности использования разработанных технических устройств.

Ключевые слова: культовые сооружения, климатизация, конвективный поток, структура, реставрация, жизненный цикл убранства, экономическая эффективность, затраты

TECHNICAL DEVICES FOR POLLUTION LOCALIZATION IN ORTHODOX CULT BUILDINGS

A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, T.N. Chudaykina, A.A. Mishin

The relevance of the study is related to the preservation of historical and cultural heritage in religious Orthodox buildings. During the service, church candles and oil in the lamps are burned in the hall, which results in the release of soot, carbon black, vegetable fat, moisture, etc., which settle on the decoration, causing irreparable damage. To give the decoration its former attractive appearance and delay aging, significant costs are required for restoration work and maintenance of the internal microclimate. It has been established that polluted air, candle combustion products, and heat flows from the heated surface are transferred to the volume of the room. One of the sources of the heated surface in the worship hall are heating devices that form convective flows, as well as heat from the flame of burning candles. The authors have developed a technical device located above the heating device in the form of a horizontal guide with an arc-shaped profile inside to ensure the deviation of the polluted convective flow from the wall into the room. It has been proved that the device used ensures stable deflection of the polluted flow from the wall and the decoration placed on its surface. A technical device in the form of a candlestick with an umbrella for catching and removing soot, carbon, moisture, vegetable fat in the places of their formation has also been developed. This allows preserving the historical and cultural heritage and ensuring a reduction of the costs for restoration work. In the article, the authors propose a methodology for assessing the economic efficiency of using the developed technical devices.

Keywords: religious buildings, air conditioning, convective flow, structure, restoration, life cycle of decoration, economic efficiency, costs

Для расчета экономической эффективности важно оценить масштабность реставрационных работ и стоимость затрат на воссоздание убранства православных храмов. За последние десятилетия в России построено и полностью восстановлено (отреста- врировано) более 30 тысяч храмов, среди самых известных такие храмы и соборы, как храм Новомучеников и исповедников Церкви Русской на Лубянке, церковь Смоленской иконы Божией Матери в Пулкове, Патриарший собор Воскресения Христова, храм Рождества Христова на Песках, кафедральный собор Александра Невского, кафедральный собор Казанской иконы Божией Матери, Спасский кафе- дральный собор (г.Пенза) и многие другие (рис. 1).

Строительство, восстановление и реставрация храмов, соборов и церквей – технически сложный и экономически затратный процесс, который должен соответствовать не только инженерным требованиям, но и религиозным канонам. Самым трудоемким и затратным является восстановление золочения и росписи, которые наиболее подвержены разрушению от воздействия времени и неблаго- приятных условий. Сложности выполнения росписи и проведения реставрационных работ в православных культовых сооружениях связаны с их масштабностью, особенностью религиозных композиций и применением дорогостоящих материалов (краски, эмаль, сусальное золото и т.п.) [1, 2].

Расчеты сметной стоимости реставрационных работ и технико-экономическое сравнение различных мероприятий не менялись более 10 лет. На протяжении многих лет специалисты руководствовались сборником сметных норм (СНН-84) и коэффи- циентом перерасчета для составления сметы на выполнение реставрационных работ.

Представители реставрационных мастерских неоднократно обращались в Мини- стерство строительства РФ и Министерство культуры РФ с просьбой пересмотреть ранее рекомендованные правительством расценки. В результате в 2020 г. Мини- стерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ внесло изменения в Методику определения сметной стоимости и утвердило их приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 4 августа 2020 г. № 421/пр.

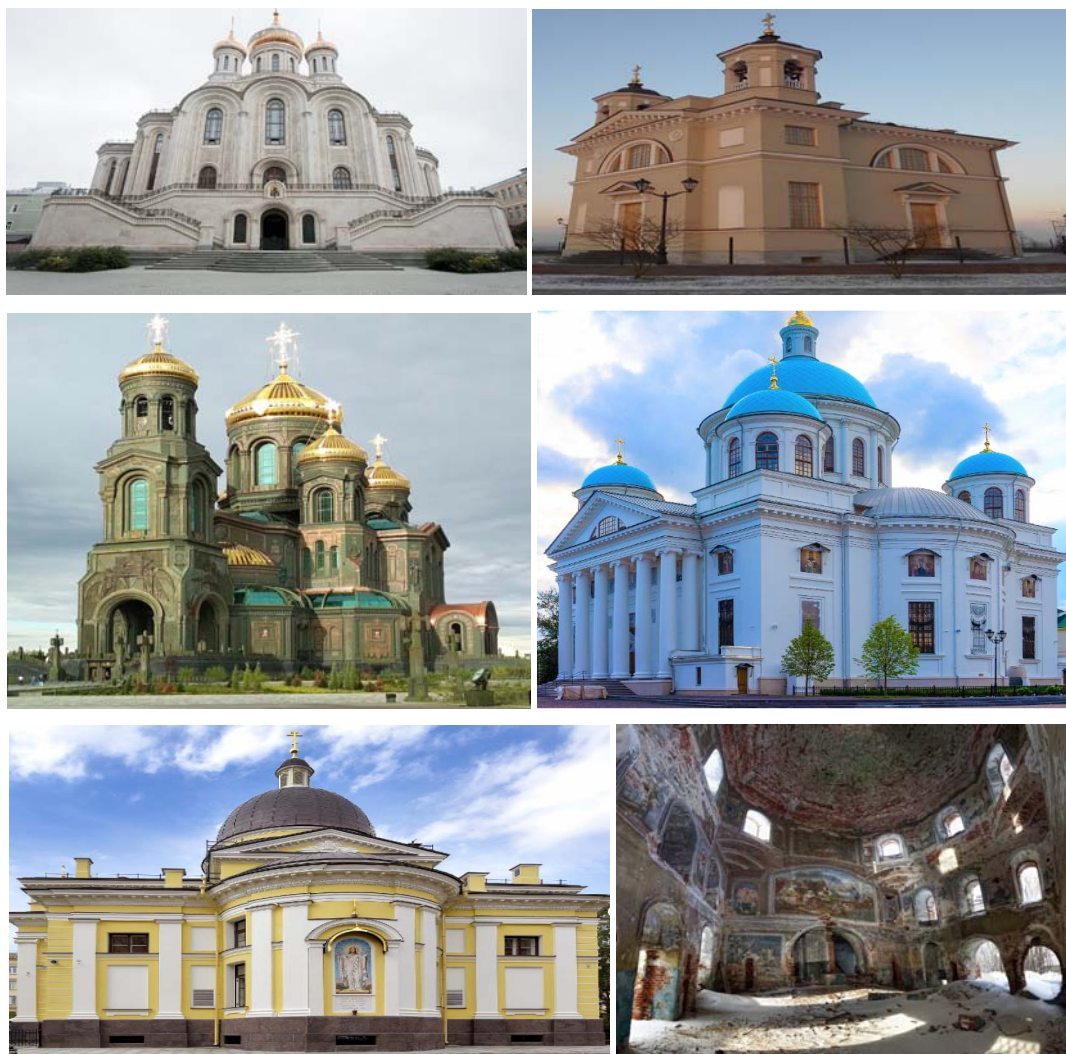


Рис. 1. Общий вид некоторых православных культовых сооружений

Составление сметы обязательно в случаях, когда финансирование осуществляется за счет бюджетных средств. В остальных случаях наличие сметы не требуется (ст. 709 ГК РФ), если в договоре указана цена или способ ее определения. Такое положение позволяет реставраторам самостоятельно определять цену реставрационных работ в зависимости от первоначальной стоимости убранства. Предлагаемый подход дает возможность оценивать эффективность используемых технических мероприятий для снижения неблагоприятного воздействия от копоти, сажи, жира, образующихся при сгорании церковных свечей и масла в лампадах.

Известно, что средняя стоимость росписи в православных храмах в России за 1 м² варьируется от 5 до 60 тысяч рублей, в зависимости от срока эксплуатации убранства и уровня повреждения.

В статье рассматриваются характерные виды реставрационных работ по сохранению убранства в залах богослужения православных храмов.

На сохранение и отсрочку старения убранства объектов культурного наследия в период жизненного цикла существенное влияние оказывают внутренние климатические условия (температура, относительная влажность, скорость и чистота воздуха), которые поддерживаются с помощью систем климатизации, вентиляции, кондиционирования воздуха, отопления [4, 5].

С целью оптимизации затрат на реставрацию убранства залов богослужения православных храмов авторами впервые созданы техническое устройство для локализации и удаления выделяющихся вредностей от сгорания церковных свечей и масла в

лампадах над подсвечником и техническое устройство над отопительным прибором, которые разработаны на основе исследования закономерностей движения тепловых конвективных потоков от отопительных приборов и теплоты горящих свечей. Применение этих устройств обеспечивает устойчивое отклонение загрязненного теплового потока от поверхности стен с церковным убранством, а также улавливание и удаление копоти, сажи, жира, влаги за пределы здания. Это позволяет сохранить церковное убранство в первоначальном виде, сократить стоимость реставрационных работ и продлить сроки службы убранства в период жизненного цикла. Изготовление, приобретение, монтаж и эксплуатация данных технических устройств требуют определенных финансовых затрат, которые необходимо учитывать при расчете экономической эффективности.

В качестве примера для оценки экономической эффективности предлагаемых авторами мероприятий за основу взята роспись зала богослужения Спасского кафедрального собора г. Пензы. Цена росписи собора, согласно проведенным конкурсным торгам, варьируется от 30 до 60 тысяч за 1 м². Объем выполняемых работ составляет 3500 м². Данные затраты коррелируют со среднестатистическими данными по России.

Для дальнейших экономических расчетов первоначальная стоимость росписи принята 45 тысяч за 1 м², как средняя по России. Предложенная авторами методика расчета и оценки экономической эффективности реставрационных работ осуществлялась на основе методики оценки жизненного цикла убранства залов богослужения. В процессе исследования рассматривались два варианта эксплуатации убранства: без применения технических устройств и с их применением.

Технико-экономический расчет и оценка экономической эффективности осуществлялись в два этапа. Согласно первому этапу, предлагается выполнить расчет капитальных вложений на создание разработанных технических устройств над отопительным прибором и подсвечником в комплексе с системой местной механической вытяжной вентиляции. Для этого на примере Спасского кафедрального собора в г. Пензе были запроектированы четыре системы местной вытяжной вентиляции с техническим устройством над подсвечником (рис. 2) и техническое устройство над отопительным прибором (рис. 3). Выполнен гидравлический расчет четырех систем местной вытяжной вентиляции, определены размеры воздухопроводов и тип вентиляционного оборудования, разработана спецификация на предложенные технические устройства [5].

При реставрации убранства в залах богослужения используются только те виды работ, которые характерны для конкретного этапа жизненного цикла и срока эксплуатации. Реставрационные работы объектов культурного наследия требуют значительных финансовых затрат. В связи с этим проблемы обеспечения отсрочки старения и ликвидации ущерба убранства православных храмов в период жизненного цикла являются актуальными [6].

Важно отметить, что проведение различных видов и этапов реставрационных работ регламентируются Федеральным законом от 25.06.2002 г. №73-ФЗ (ред. от 26.12.2024 (с изм. и доп., вступ. в силу с 13.01.2025)), письмом Минкультуры России от 27.05.2014 г. № 106-01-39/12-ГП, письмом Минкультуры России от 21.10.2015 г. № 2625 (ред. от 11.08.2022), письмом Минкультуры России от 19.07.2017 г. № 212-01.139-ВА, ГОСТ Р 55528-2013, приказом Росстандарта от 28.08.2013 г. № 593-ст, приказом Минкультуры России от 05.06.2015 г. № 1749 (с изменениями и дополнениями от 24 июня 2016 г.), приказом Минкультуры России от 30.07.2012 г. № 811 (с изменениями и дополнениями от 24 июля 2013 г., 3 октября 2016 г.). Основываясь на данных нормативных документах, авторы разработали два технических устройства для решения проблем сохранения внутреннего убранства зала богослужения (см. рис. 2, 3).

В данной статье предложена методика определения экономической эффективности на основе метода оценки жизненного цикла убранства на примере зала богослужения Спасского кафедрального собора в г. Пензе. При этом рассматривались варианты для сохранности убранства в зале богослужения с применением и без применения технических устройств (см. рис. 2, 3).

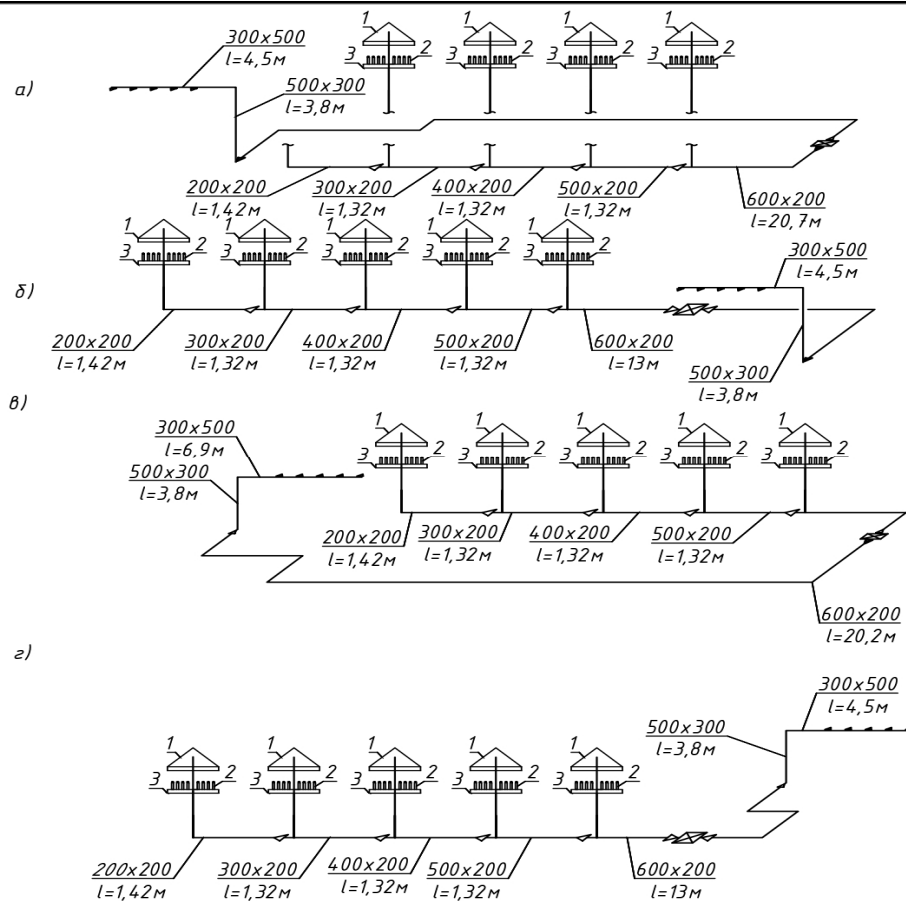


Рис. 2. Схемы систем местной вытяжной вентиляции с техническим устройством в виде зонта с подсвечником для улавливания и удаления копоти и сажи от горящих церковных свечей в Спасском кафедральном соборе города Пензы:

а – система вытяжной вентиляции В1; б – система вытяжной вентиляции В2;
в – система вытяжной вентиляции В3; г – система вытяжной вентиляции В4;
1 – вытяжной зонт; 2 – церковные свечи; 3 – столешница подсвечника

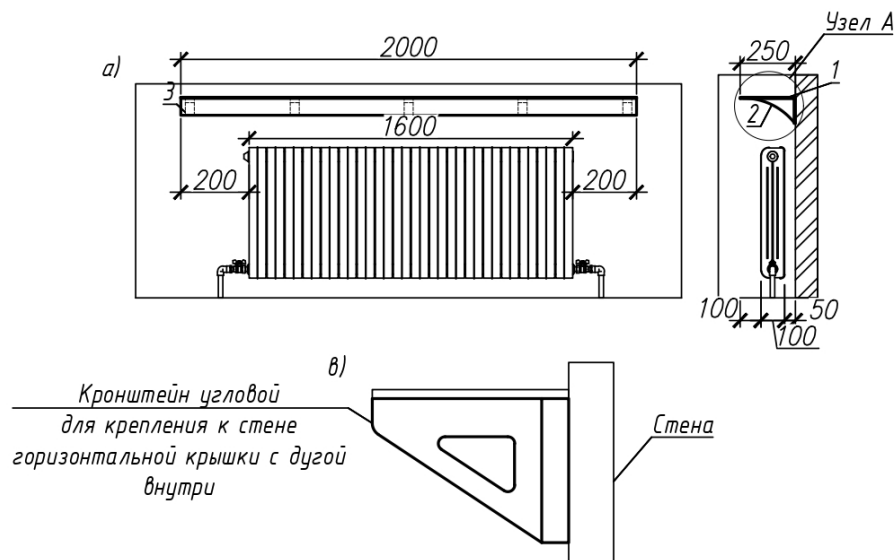


Рис. 3. Техническое устройство – узел установки отопительного прибора с горизонтальной направляющей с дугой внутри:

а – вид спереди; б – вид сбоку; в – узел А;
1 – горизонтальная направляющая; 2 – внутренняя дуга; 3 – кронштейн крепления к стене

На первом этапе был произведен расчет капитальных вложений на основе локальной сметы для запроектированных четырех местных вытяжных систем в виде подсвечника с зонтом (см. рис. 2) и технического устройства над отопительным прибором в виде горизонтальной направляющей с дугой внутри (см. рис. 3). По результатам спецификации на оборудование, монтаж и т.п. составлена локальная смета, которая позволила получить суммарные капитальные вложения для двух технических устройств $K_{\text{ты}} = 5\,823\,049$ руб.

На втором этапе предлагается выполнить расчет эксплуатационных затрат на два разработанных технических устройства по формуле

$$C_{\text{ты}} = T + A_{\text{м}} + \Xi + B_{\text{д}} + X + 3 + P_{\text{т}} + P_{\text{к}} + Y, \quad (1)$$

где $T_{\text{ты}}$ – затраты на тепло (одинаковые по вариантам), руб./год; $A_{\text{м}}$ – годовые амортизационные отчисления, руб./год; Ξ – затраты на электроэнергию, руб./год; $B_{\text{д}}$ – стоимость воды (одинаковая по вариантам), руб./год; X – затраты на холод (отсутствуют), руб./год; $P_{\text{т}}, P_{\text{к}}$ – затраты на текущий и капитальный ремонт, руб./год; 3 – заработная плата обслуживающего персонала, руб./год; Y – затраты на управление, технику безопасности, охрану труда, спецодежду, руб./год.

Согласно формуле (1), расчет эксплуатационных затрат производится на основе усредненных нормативов.

В 2025 году амортизация вентиляционных установок будет осуществляться в соответствии с правилами и нормами бухгалтерии, утвержденными Министерством финансов (Федеральный стандарт бухгалтерского учета ФСБУ 6/2020, приложение №1 к приказу Министерства финансов РФ от 17.09.2020 №204н).

Амортизация может проводиться различными способами в зависимости от выбранной организацией системы налогообложения и учета. В расчете применяется линейный метод начисления амортизации. В этом случае стоимость вентустановки равномерно распределяется на протяжении всего срока её службы. Обычно принимается во внимание среднестатистический срок эксплуатации для данного типа оборудования (от 3 до 10 лет). Следовательно, норму амортизации предлагается определять по формуле

$$H_{\text{а}} = (1/T) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где T – срок эксплуатации для данного типа оборудования (от 3 до 10 лет).

Сумма годовой амортизации по линейному методу вычисляется по формуле

$$A_{\text{м}} = C_{\text{перв}} \cdot (H_{\text{а}}/100 \%), \quad (3)$$

где $C_{\text{перв}}$ – первоначальная стоимость объекта амортизации.

Амортизация системы вытяжной вентиляции является важной составляющей финансового учета предприятия.

Затраты на электроэнергию рассчитываются из условия периода работы (12 часов, 365 дней) системы вентиляции и тарифа на электроэнергию 4,61 руб./кВт·ч (приказ №26-84 от 26.12.2024 г. «Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему потребителей на 2025 год») по формуле

$$\Xi = 4,61 \cdot N_{\text{уст}} \cdot 12 \cdot 365. \quad (4)$$

Запроектированы четыре местные механические вытяжные системы. В каждой установлена одна вытяжная вентустановка мощностью $N_{\text{уст}} = 0,75$ кВт, для четырех установок мощность составит $N_{\text{уст}} = 3$ кВт. Кроме того, используются четыре частотных преобразователя двигателя мощностью $N_{\text{уст}} = 3$ кВт, суммарная установочная мощность составляет $N_{\text{уст}} = 6$ кВт.

Расчет заработной платы обслуживающего персонала (руб./год) определяется по формуле

$$3 = 22\,400 \cdot n \cdot 12, \quad (5)$$

где 22 400 – минимальный размер оплаты труда на 01.01.2025 согласно Федеральному закону «О минимальном размере оплаты труда» от 19.06.2000 N 82-ФЗ (редакция от 29.10.2024 №365-ФЗ), руб.; n – численность обслуживающего персонала, чел.; 12 – количество месяцев в году.

Расчет затрат на текущий P_t и капитальный P_k ремонт определяется по формуле

$$P_t P_k = 0,2 A_m = 0,023 K_{ty}. \quad (6)$$

Затраты на управление, технику безопасности, охрану труда Y составляют 30 % от суммы амортизационных отчислений, затрат на текущий ремонт и заработную плату:

$$Y = 0,3 \cdot (A_m + P_t + 3). \quad (7)$$

Результаты расчета эксплуатационных затрат для двух рассматриваемых установок приведены в табл. 1. Срок эксплуатации принят 10 лет.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета эксплуатационных затрат на систему местной вытяжной вентиляции с применением технического устройства в виде вытяжного зонта

№ п/п	Наименование затрат	Условное обозначение	Формула расчета	Затраты, руб./год
1	Затраты на тепло	T		
2	Годовые амортизационные отчисления	A_m	$A_m = C_{перв} \cdot (H_a/100 \%)$	582 304,9
3	Затраты на электроэнергию	$\mathcal{E}$	$\mathcal{E} = 4,61 \cdot N_{уст} \cdot 24 \cdot 365$	121 150,8
4	Затраты на текущий и капитальный ремонт	P_t, P_k	$P_t P_k = 0,2 A_m = 0,023 K_{ty}$	133 930,1
5	Заработная плата обслуживающего персонала	3	$3 = 22\,400 \cdot n \cdot 12$	806 400
6	Затраты на управление, технику безопасности, охрану труда, спецодежду	Y	$Y = 0,3 \cdot (A_m + P_t + 3)$	456 790,5
	Итого C_{ty}			2 100 576,3

Опыт проведения реставрационных работ во многих православных храмах страны показал, что жизненный цикл убранства залов богослужения можно разделить на следующие этапы: 20 лет, 40 лет, 60 лет, 80 лет, 100 лет [6].

Затраты на выполнение реставрационных работ на примере Спасского кафедрального Собора в г. Пензе приняты в процентах от первоначальной стоимости росписи, золочения и другого убранства, равной 210 млн руб. Для каждого этапа затраты составляют соответственно 1, 2, 3, 4, 5 % при условии использования технических средств для улавливания и удаления копоти и сажи от горящих свечей и отклонения загрязненного теплового потока от поверхности стен с размещенным на них убранством (табл. 3, строка 1). Для данного случая затраты на выполнение реставрационных работ по этапам жизненного цикла составляют соответственно 2,1; 4,2; 6,3; 8,4; 10,5 млн руб. от первоначальных затрат 210 млн руб. (см. табл. 3, строка 2). Для сравнительного экономического анализа представлены затраты на выполнение реставрационных работ без использования технических устройств. В этом случае процент затрат на реставрацию для принятых этапов жизненного цикла убранства залов богослужения 20, 40, 60, 80, 100 лет составляет соответственно 6, 8, 10, 12, 15 %, или в стоимостном выражении – 12,6; 16,8; 21,1; 25,2; 31,5 млн руб. от первоначальных затрат (см. табл. 3, строка 4, строка 5).

Сравнительный анализ (см. табл. 3, строка 6) показал, что условный экономический эффект от применения технических средств без учета капитальных и эксплуатационных затрат и инфляционного показателя I_n , согласно этапам жизненного цикла убранства залов богослужения, составляет соответственно 10,5; 12,5; 14,8; 16,8; 21 млн руб. Сокращение затрат при применении предложенных авторами технических устройств обусловлено чистотой внутреннего воздуха и удалением копоти, сажи, влаги, газов из зала богослужения в размере 90-95 % за пределы помещения.

При принятии инвестиционных решений необходимо учитывать ежегодно изменяющийся уровень инфляции. Игнорирование инфляции может привести к снижению реальной доходности вложенных средств, а иногда – к их потере. Правильный учет уровня инфляции при расчете планируемого дохода позволит повысить эффективность вложенного капитала и достичь желаемого дохода на одном из этапов жизненного цикла. Определяя цели инвестирования, необходимо учитывать прогнозируемый уровень инфляции, чтобы правильно оценить объем вложенных средств и принять обоснованное инвестиционное решение на ближнюю и дальнюю перспективу.

В табл. 2 для прогнозного анализа представлены значения уровня инфляции за 2000-2025 годы (на январь рассматриваемого периода).

Т а б л и ц а 2

Значение уровня инфляции за 2000-2025 годы
(данные на январь исследуемого периода)

Год	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Уровень инфляции	28,93	20,71	18,96	14,29	11,28	12,7	10,71	8,2	12,56	13,35	8,02	9,56	4,16	7,07	6,05	14,97	9,77	5,02	2,21	5	2,42	5,19	8,74	11,76	7,44	9,92

По данным значениям, приведенным в табл. 2, построен график (рис. 4), на котором показан уровень инфляции за последние 25 лет, также разработана линия тренда, по которой можно предполагать снижение уровня инфляции в ближайшие годы.

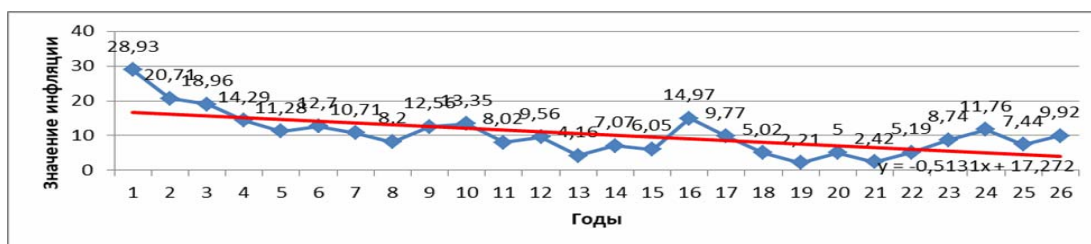


Рис. 4. Уровень инфляции за 2000-2025 годы (на январь рассматриваемого периода)

По представленным данным авторами разработана экономико-математическая модель (формула (8)), которая позволит рассчитать прогнозный уровень инфляции:

$$y = -0,5131x + 17,272. \quad (8)$$

Далее авторы рассчитали прогнозируемые затрат на реставрационные работы с учетом и без учета инфляционного показателя I_n в разные этапы жизненного цикла убранства залов богослужения с применением и без применения технических устройств. Сравнительные данные затрат представлены в табл. 3.

Прогнозируемые затраты на реставрационные работы в зале богослужения
Спасского кафедрального собора г. Пензы

№ п/п	Наименование затрат	Периоды жизненного цикла убранства зала богослужения					Примечание
		20 лет	40 лет	60 лет	80 лет	100 лет	
С применением авторских технических устройств							
1	Проценты от первоначальных затрат на роспись	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %	Первоначаль- ная стоимость росписи 210 млн руб.
2	Фактические за- траты на реставра- ционные работы от первоначаль- ной стоимости росписи, млн руб.	2,1	4,2	6,3	8,4	10,5	$Z_{ту}$, млн руб./год
3	Изменение стоимо- сти реставрацион- ных расходов, капитальных и эксплуатационных затрат, с приме- нием инфляцион- ного показателя I_n	2,1 I_n	4,2 I_n	6,3 I_n	8,4 I_n	10,5 I_n	Инфляционный показатель I_n
Без применения авторских технических устройств							
4	Проценты от первоначальных затрат на роспись	6 %	8 %	10 %	12 %	15 %	Первоначаль- ная стоимость росписи 210 млн руб.
5	Фактические за- траты на реставра- ционные работы от первоначаль- ной стоимости росписи, млн руб.	12,6	16,8	21,1	25,2	31,5	$Z_{бту}$, млн руб./год
6	Изменение стои- мости реставраци- онных работ с учет- ом инфляционных показателей	12,6· I_n	16,8· I_n	21,1· I_n	25,2· I_n	31,5· I_n	Инфляционный показатель I_n
6	Экономический эффект от приме- нения техниче- ских устройств без учета I_n	10,5	12,5	14,8	16,8	21,0	$E_{ту}$, млн руб./год

Сравнительная оценка экономической эффективности предлагаемых авторами технических устройств без инфляционных показателей приведена на рис. 5.

Анализ графиков 1 и 2 на рис. 5 позволяет сделать вывод, что при применении технических устройств (график 1) затраты на реставрацию зала богослужения на 70 % ниже затрат на аналогичную работу, выполненную без применения технических устройств (график 2). Из анализа табл. 3 и графиков на рис. 5 следует, что по мере возрастания циклов жизнедеятельности убранства затраты на реставрационные

работы, а также на капитальные и эксплуатационные нужды существенно увеличиваются в связи с инфляционными процессами и сроком эксплуатации. При условии стабилизации экономики страны инфляция будет снижаться, что приведет, в свою очередь, к сокращению затрат на реставрационные работы.



Рис. 5. Сравнительная оценка экономических затрат на реставрационные работы без учета инфляционных показателей:

- 1 – затраты при применении технических устройств,
2 – затраты без применения технических устройств

На основе количественной оценки экономических показателей предлагается рассчитывать эффективность реставрационных работ на этапе каждого цикла с учетом изменения значений стоимости $K_{\text{ту}}$ и $C_{\text{ту}}$ в зависимости от изменения инфляционных показателей с учетом официальных данных, опубликованных Росстатом России и Правительством РФ.

Следовательно, при оценке экономической эффективности необходимо учитывать наряду с удорожанием реставрационных материалов повышение стоимости капитальных $K_{\text{ту}}$ и эксплуатационных затрат $C_{\text{ту}}$ на каждом этапе жизненного цикла. В табл. 3 приведены показатели экономической эффективности по периодам жизненного цикла без учета и с учетом инфляционного показателя $I_{\text{н}}$. Значения $I_{\text{н}}$ даны в табл. 3 для расчета $K_{\text{ту}}$, $C_{\text{ту}}$ и, как следствие, экономического эффекта $\mathcal{E}_{\text{ту}}$, млн руб./год. Численные значения $I_{\text{н}}$ не указаны в связи с отсутствием прогнозируемых показателей инфляции на более удаленный период жизненного цикла.

Согласно разработанной авторами методике оценки затрат на реставрационные работы, экономическая эффективность $\mathcal{E}_{\text{ту}}$, млн руб./год, за счет применения двух технических устройств (на примере Спасского кафедрального собора г.Пензы) в рамках первого периода жизненного цикла за первое полугодие 2025 года определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{ту}} = (Z_{\text{бту}} - Z_{\text{ту}}) \cdot I_{\text{н}} - (K_{\text{ту}} + C_{\text{ту}}) \cdot I_{\text{н}}, \quad (8)$$

где $Z_{\text{ту}}$ – фактические затраты на проведение реставрационных работ с применением технических устройств, млн руб./год (см. табл. 3, строка 2); $Z_{\text{бту}}$ – фактические затраты на проведение реставрационных работ без применения технических устройств, млн руб./год (см. табл. 3, строка 5); $K_{\text{ту}}$ – капитальные вложения на разработку технических устройств, млн руб./год; $C_{\text{ту}}$ – эксплуатационные затраты на использование технических устройств, млн руб./год (см. табл. 1); $I_{\text{н}}$ – инфляционный показатель в стране (на первое полугодие 2025 года = 10,34 %).

$$\mathcal{E}_{\text{ту}} = (12,6 - 2,1) \cdot 0,8966 - (5823049 + 2100576,3) \cdot 1,1034 = 2,76 \text{ млн руб./год.}$$

Полученный экономический эффект ($\mathcal{E}_{\text{ту}}$) за счет использования двух технических устройств изменился с 10,5 до 2,76 млн руб./год за счет инфляционного показателя $I_{\text{н}} = 10,34\%$, эксплуатационных затрат $C_{\text{ту}} = 2,1$ млн руб./год и единоразовых капитальных вложений $K_{\text{ту}} = 5,8$ млн руб./год. В последующие годы на изменение экономического эффекта будут оказывать влияние только инфляционный показатель и

эксплуатационные затраты. В данном случае капитальные вложения оказали наибольшее влияние на снижение $\dot{E}_{\text{тв}}$.

Выводы. Разработаны и запатентованы техническое устройство в виде подсвечника с зонтом для улавливания и удаления копоти, сажи и т.п. вредных веществ и техническое устройство над отопительным прибором для обеспечения отклонения загрязненного конвективного потока, образованного от нагретой поверхности отопительного прибора, от внутренней поверхности наружной стены к местам вытяжной системы вентиляции.

Предложена методика оценки экономической эффективности применения разработанных технических устройств; методика не имеет аналогов.

На основе спецификации на оборудование и материалы составлена локальная смета, определены капитальные и эксплуатационные затраты для двух технических устройств с учетом инфляционного показателя.

Список литературы

1. Болотов, Е.Н. Храмы православные. Как сохранить наследство / Е.Н. Болотов // АВОК. – 2024. – № 3. – С. 180–186.
2. Болотов, Е.Н. Сохранение наследия: микроклимат музеев / Е.Н. Болотов // АВОК. – 2018. – № 1. – С. 170–176.
3. АВОК СТАНДАРТ-2-2004. Отраслевой стандарт «Храмы православные: отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха». – Москва : АВОК-Пресс, 2004. – С. 1–16.
4. Табунщиков, Ю.А. Оптимальные параметры внутреннего воздуха исторических зданий: методика определения / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бородач // АВОК. – 2018. – № 3. – С. 148–155.
5. Беляев, К.В. Опыт оптимизации воздухораспределения и параметров микроклимата в православном храме / К.В. Беляев, А.В. Гарбарук, Д.А. Никулин, М.Х. Стрелец // АВОК. – 2021. – № 7. – С. 60–64.
6. Баронин, С.А. Развитие национальных проектов на основе контрактов на жизненные циклы по объектам капитального строительства / С.А. Баронин, А.И. Еремкин, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2 (43). – С. 100–108.

References

1. Bolotov, E.N. Orthodox churches. How to preserve the heritage / E.N. Bolotov // AVOK. – 2024. – No. 3. – P. 180–186.
2. Bolotov, E.N. Preservation of heritage: microclimate of museums / E.N. Bolotov // AVOK. – 2018. – No. 1. – P. 170–176.
3. AVOK STANDARD-2-2004. Industry standard «Orthodox churches: heating, ventilation, air conditioning». – Moscow : AVOK-Press, 2004. –C. 1–16.
4. Tabunshchikov, Yu.A. Optimum parameters of indoor air in historic buildings: determination methodology / Yu.A. Tabunshchikov, M.M. Borodach // AVOK. – 2018. – No. 3. – P. 148–155.
5. Belyaev, K.V. Experience in optimizing air distribution and microclimate parameters in an Orthodox church / K.V. Belyaev, A.V. Garbaruk, D.A. Nikulin, M.Kh. Strelets // AVOK. – 2021. – No. 7. – P. 60–64.
6. Baronin, S.A. Development of national projects based on life cycle contracts for capital construction projects / S.A. Baronin, A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 2 (43). – P. 100–108.

УДК 662.769+683.87+004.942

DOI 10.54734/20722958_2025_3_146

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

Столяров Даниил Владимирович,
аспирант кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: sdv@bk.ru

Королева Тамара Ивановна,
кандидат экономических наук, профессор
кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: korolevatamara@mail.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,
тел.: (8412) 20-83-90

Суровицкая Галина Владимировна,
кандидат технических наук, доктор
экономических наук, профессор кафедры
«Физика»
E-mail: gvs69@inbox.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

Stolyarov Daniil Vladimirovich,
Postgraduate student of the Department «Heat
and Gas Supply and Ventilation»
E-mail: sdv@bk.ru

Koroleva Tamara Ivanovna,
Candidate of Economic Sciences, Professor of
the Department «Heat and Gas Supply and
Ventilation»
E-mail: korolevatamara@mail.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
tel.: (8412) 20-83-90

Surovitskaya Galina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Doctor of Economic
Sciences, Professor of the Department
«Physics»
E-mail: gvs69@inbox.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ МЕТАНОВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ В ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ

Д.В. Столяров, Т.И. Королева, Г.В. Суровицкая

Представлены результаты исследования процессов турбулентного диффузионного и кинетического горения метановодородных топливных смесей с воздухом в газовых горелочных устройствах малой и средней тепловой мощности. Приводится математическая постановка задачи о нестационарном течении многокомпонентной неравновесно реагирующей газозвушной смеси. На основе результатов численного моделирования показано, что с возрастанием массовой доли водорода в исходной смеси максимальные значения массовых долей продуктов неполного сгорания метана и оксида углерода (IV) убывают, а максимальные значения массовых долей суммы оксидов азота возрастают, что связано с увеличением статической температуры факела пламени.

Ключевые слова: численное моделирование, процессы сгорания, газовые горелки, топливные смеси, CFD-моделирование, процессы турбулентного горения, сжигание газообразных топлив, теплогенерирующие установки, образование вредных веществ

NUMERICAL SIMULATION OF THE COMBUSTION PROCESS OF METHANE-HYDROGEN FUEL MIXTURES IN HEAT GENERATING PLANTS

D.V. Stolyarov, T.I. Koroleva, G.V. Surovitskaya

The article investigates the processes of turbulent diffusion and kinetic combustion of methane-hydrogen fuel mixtures with air in gas burner devices of low and medium thermal power. The mathematical formulation of an problem of the unsteady flow of a multicomponent nonequilibrium reacting gas-air mixture is given. Based on the results of numerical modeling, it is shown that with an increase in the mass fraction of hydrogen in the initial mixture, the maximum values of the mass fractions of the products of incomplete combustion of methane and carbon monoxide (IV) decrease,

and the maximum values of the mass fractions of the sum of nitrogen oxides increase, which is associated with an increase in the static temperature of the flame torch.

Keywords: numerical modeling, combustion processes, gas burners, fuel mixtures, CFD modeling, turbulent combustion processes, combustion of gaseous fuels, heat-generating units, formation of harmful substances

Введение. Использование метановодородных топливных смесей (МВТС) в качестве газообразного топлива в теплогенерирующих установках позволяет, с одной стороны, обеспечить существенную экономию энергоносителей, относящихся к традиционным видам ископаемых углеводородных топлив, в частности природного газа, а также сократить количество выбрасываемых в атмосферу газообразных отходов нефтегазохимического и угольного производства. С другой стороны, физико-химические свойства МВТС, а также характеристики процесса их сгорания значительного отличаются от таковых свойств и характеристик природного газа. Данной проблеме посвящена настоящая работа.

Исследованию особенностей применения МВТС в качестве топлива для теплогенерирующих и промышленных газотурбинных установок посвящено большое число работ [1–4]. Из них необходимо отметить работу [2], поскольку ее авторами рассмотрены результаты численного моделирования трехмерного нестационарного турбулентного диффузионного горения МВТС с воздухом в камере сгорания парового котла ТГМЕ-464, оснащенного горелочным устройством ГМУ-45 номинальной тепловой мощностью 45 МВт. Моделирование выполнялось в процессоре CFD Star-CCM+ с использованием RANS-подхода, при этом для замыкания системы дифференциальных уравнений, описывающих течение реагирующей газовой смеси, применялись уравнение состояния для смеси идеальных газов и модель турбулентности k - ϵ Realizable. Для моделирования турбулентного горения использовался подход частично перемешанного горения с применением модели Flamelet Generated Manifolds (FGM). Для описания протекающих химических реакций авторами работы использовался детальный кинетический механизм окисления природного газа GRI-Mech 3.0, включающий 53 компонента и 325 элементарных химических реакций. В рассматриваемой работе представлены полученные ключевые результаты:

- показано возрастание действительной температуры горения МВТС с увеличением массовой доли H_2 в топливной смеси: от $T_{\max} = 2041$ К при $\omega(H_2) = 0$ до $T_{\max} = 2258$ К при $\omega(H_2) = 0.3$;
- зарегистрировано смещение зоны с максимальной действительной температурой горения к области ввода топливной смеси с увеличением массовой доли H_2 ;
- ожидаемо получено убывание массовых долей образующихся CO и CO_2 , являющихся продуктами неполного и полного сгорания CH_4 соответственно, с увеличением массовой доли H_2 , но при этом отмечено возрастание массовой доли суммы оксидов азота (NO_x) из-за увеличения температуры газовой среды в камере сгорания.

Однако выбранные авторами работы [2] методы численного моделирования содержат недостатки, а именно: не исследуются процессы сгорания МВТС с массовой долей водорода $\omega(H_2) > 0.3$, где значительно возрастает вероятность детонации и снижения устойчивости горения, а также увеличиваются концентрации NO_x . Кроме того, по данным работы [5], моделирование, выполненное на основе кинетического механизма GRI-Mech 3.0, завышает период индукции воспламенения чистого водорода при температуре 1000–1350 К, однако для метановодородных смесей период индукции воспламенения значимо уменьшается при температуре 1100–1450 К. В этой связи предпочтительным является использование детального кинетического механизма окисления МВТС Wang-2018 [7], результаты моделирования на основе которого хорошо согласуются с экспериментальными данными.

К общим недостаткам работ [1–4] необходимо отнести то, что в них рассматриваются результаты исследований процессов сгорания природного газа, водорода и МВТС преимущественно в горелочных устройствах промышленных и энергетических

теплогенерирующих установок высокой и сверхвысокой мощности; при этом результаты численного моделирования процесса сгорания МВТС для горелочных устройств малой и средней тепловой мощности в научно-технической литературе не представлены.

Таким образом, выполненная работа является логичным продолжением теоретических исследований горения МВТС применительно к горелочным устройствам малой и средней тепловой мощности.

Материалы и методы исследования. Для описания процесса и характеристик горения МВТС с воздухом в диффузионном и кинетическом горелочных устройствах сформулирована задача о нестационарном течении многокомпонентной неравновесно реагирующей газовой смеси, замкнутая моделью химической кинетики и дифференциальной моделью турбулентности.

Исследовались следующие горелочные устройства: диффузионная горелка ГГУ-9 номинальной тепловой мощностью 9 кВт, представляющая собой горелочное устройство малой мощности, и кинетическая горелка ГВБ-10С с принудительной подачей воздуха в зону сгорания номинальной тепловой мощностью 116 кВт, являющаяся горелочным устройством средней мощности. Схемы расчетных областей задач о диффузионном и кинетическом турбулентном горении МВТС с воздухом представлены на рис. 1.

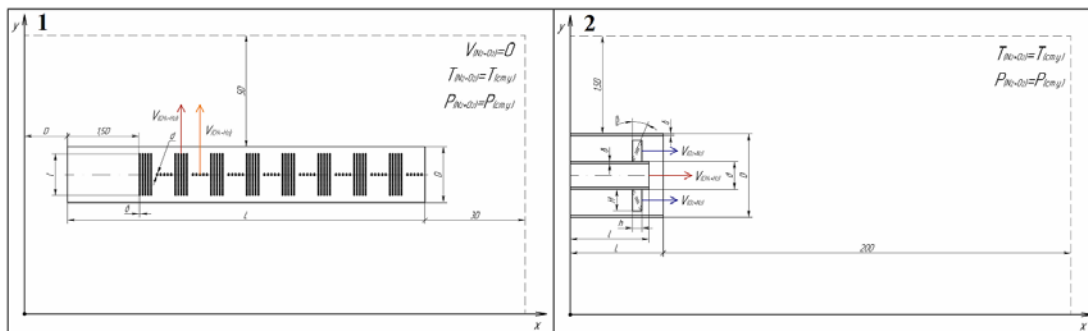


Рис. 1. Схемы расчетных областей задач:

- 1 – схема расчетной области задачи о диффузионном горении МВТС с воздухом;
2 – схема расчетной области задачи о кинетическом горении МВТС с воздухом

Геометрические размеры горелочных устройств, указанные на рис. 1(1) и 1(2), выбраны согласно проектным характеристикам газовых горелок, предоставленных предприятиями-изготовителями [7, 8]. Геометрические размеры расчетных областей задач определялись исходя из значений внешнего диаметра D сопла горелочных устройств: пусть D – калибр, тогда в задаче о диффузионном горении МВТС координаты расчетной области в декартовой прямоугольной системе координат в пространстве выбраны следующими: $\{(x, y, z): 0 \leq x \leq L + 4D; 0 \leq y \leq 11D; 0 \leq z \leq 11D\}$; по аналогии в задаче о кинетическом горении МВТС координаты расчетной области выбраны следующими: $\{(x, y, z): 0 \leq x \leq L + 20D; 0 \leq y \leq 4D; 0 \leq z \leq 4D\}$.

Запишем теперь для декартовой системы координат систему уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS), которая включает в себя следующие уравнения:

– уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0; \quad (1)$$

– уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\delta_{ij} p) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) - \rho g = 0; \quad (2)$$

– уравнение энергии, которое для рассматриваемого течения с горением удобно представить в следующем виде

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho I) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j I) - \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \sum_{k=1}^N i_k D_k \frac{\partial c_k}{\partial x_j} \right) - Q_x - \dot{Q}_p = 0; \quad (3)$$

– уравнение сохранения массы k -го химического компонента

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j c_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho (D_k + D_{k(t)}) \frac{\partial c_k}{\partial x_j} \right) = \dot{W}_k; \quad (4)$$

– уравнение состояния для смеси идеальных газов

$$p = \rho R T \sum_{k=1}^N \frac{c_k}{M_k}, \quad (5)$$

где ρ – плотность газовой смеси, кг/м^3 ; u_i – компонента скорости течения газовой смеси в i -м направлении, м/с ; u_j – компонента скорости течения газовой смеси в j -м направлении, м/с ; p – давление газовой смеси, Па ; τ_{ij} – тензор напряжений, $\tau_{ij} = \bar{\tau}_{ij} + \bar{\tau}_{ij,t}$; δ_{ij} – символ Кронекера; g – ускорение свободного падения, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$; I – полная энтальпия газовой смеси, Дж ; λ – коэффициент теплопроводности газовой смеси, Вт/(м·К) , $\lambda = \lambda_m + \lambda_t$; T – температура газовой смеси, К ; i_k – удельная энтальпия k -го компонента газовой смеси, Дж/кг ; D_k – коэффициент молекулярной диффузии k -го компонента газовой смеси, $\text{м}^2/\text{с}$; $D_{k(t)}$ – коэффициент турбулентной диффузии k -го компонента газовой смеси, $\text{м}^2/\text{с}$; c_k – массовая доля k -го химического компонента; Q_x – объемная плотность тепловыделения в газовой смеси за счет протекающих химических реакций, Вт/м^3 ; $\dot{Q}_p$ – дивергенция радиационного теплового потока, Вт/м^3 ; M_k – молярная масса k -го химического компонента, кг/моль ; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8.314 \text{ Дж/(моль·К)}$.

Для описания турбулентного течения газовой смеси в работе используется модель переноса касательных напряжений Менстера (MSST), являющаяся комбинацией моделей k - ϵ и k - ω . Для пристеночного слоя применяется модель k - ω , а для внешнего региона – модель k - ϵ . Из-за объемности математического описания модели турбулентности MSST она не приводится в настоящей работе. Основные уравнения и соотношения для стандартной модели SST представлены в работе [8].

Моделирование радиационного теплообмена авторами настоящей работы осуществляется посредством решения уравнения переноса излучения (RTE), описывающего изменение интенсивности излучения $I_v(\vec{r}, \vec{s})$ в заданной точке $\vec{r}$ и направлении $\vec{s}$ с учетом излучения, поглощения и рассеяния, методом дискретных ординат (DO). При этом для расчета коэффициента поглощения газообразной среды ($\kappa_v = \kappa$), входящего в RTE, используется метод взвешенной суммы серых газов (WSSG) [9], часто применяемый в задачах моделирования турбулентного горения.

Для моделирования турбулентного горения в настоящей работе, как и в работе [2], авторами применяется метод FGM, основанный на предположении, что сложное многомерное пространство химических состояний можно свести к низкоразмерному многообразию, параметризованному сравнительно небольшим числом переменных. Достоинство этого метода состоит в том, что он позволяет использовать детальные многостадийные кинетические механизмы с большим количеством реакций. Действительно, в настоящей работе представлены результаты моделирования, выполненного

на основе детального кинетического механизма окисления MBTC Wang-2018, содержащего 48 компонентов и 352 элементарные химические реакции.

Концентрации загрязняющих веществ в ходе исследования определяются на основе следующих моделей: концентрации CO и CO₂ – на основе кинетической модели Wang-2018, т.к. согласно [6], данный кинетический механизм окисления MBTC является наиболее точным для прогнозирования концентраций CO и CO₂ в горючих смесях стехиометрического состава; концентрации сажевых частиц в различных частях камеры сгорания исследуемых горелочных устройств находят с использованием модели Мосса – Брукса, учитывающей процессы нуклеации, роста и окисления сажевых частиц в реакционном объеме; концентрации NO_x рассчитываются на основе решения уравнений скорости их образования, протекающего по расширенному механизму Я.Б. Зельдовича (термические NO_x) и по механизму С.В. Фенимора (сверхравновесные NO_x).

Граничные условия для расчетных областей рассматриваемых задач выбраны следующими:

- в задаче о диффузионном горении MBTC с воздухом: на нижней и боковых границах расчетной области заданы характеристические граничные условия, предполагающие, что за пределами расчетной области находится покоящийся воздух с температурой и давлением, равными температуре и давлению газов при стандартных условиях; на верхней границе расчетной области заданы условие сноса параметров газовой среды в заграничную ячейку расчетной сетки изнутри расчетной области, а также постоянная величина статического давления $P_{г.с.} = 1$ атм; в области ввода смеси горючих веществ в зону сгорания задан массовый расход MBTC, определяемый по следующей формуле:

$$G_{m(\Sigma)}^{ном.} = G_{V(\Sigma)}^{ном.} \cdot [y(H_2) \cdot \rho(H_2) + y(CH_4) \cdot \rho(CH_4)];$$

- в задаче о кинетическом горении MBTC с воздухом: на нижней, верхней и всех боковых границах расчетной области, за исключением правой боковой границы (см. рис. 1(2)), заданы характеристические граничные условия, предполагающие, что за пределами расчетной области находится покоящийся воздух с температурой и давлением, равными температуре и давлению газов при стандартных условиях; на правой боковой границе расчетной области заданы условие сноса параметров газовой среды в заграничную ячейку расчетной сетки изнутри расчетной области, а также постоянная величина статического давления $P_{г.с.} = 1$ атм; в области ввода смеси горючих веществ в зону сгорания задан массовый расход MBTC, определяемый по формуле, аналогичной для случая диффузионного горения; в области ввода окислителя в зону сгорания – массовый расход воздуха, определяемый по следующей формуле:

$$G_m(N_2 + O_2) = \frac{1}{\omega_{возд.}(O_2)} [8\omega(H_2) + 4\omega(CH_4)] \cdot G_{m(\Sigma)}^{ном.}.$$

Численное решение рассматриваемых задач производилось по методу МКЭ в процессоре CFD Ansys Fluent 2025R1.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим результаты решения задачи о нестационарном течении многокомпонентной неравновесно реагирующей газовой смеси, замкнутой моделью химической кинетики и дифференциальной моделью турбулентности в квазистационарном приближении. На рис. 2, 3 представлены графики распределения поля статических температур пламени при диффузионном и кинетическом горении MBTC с воздухом.

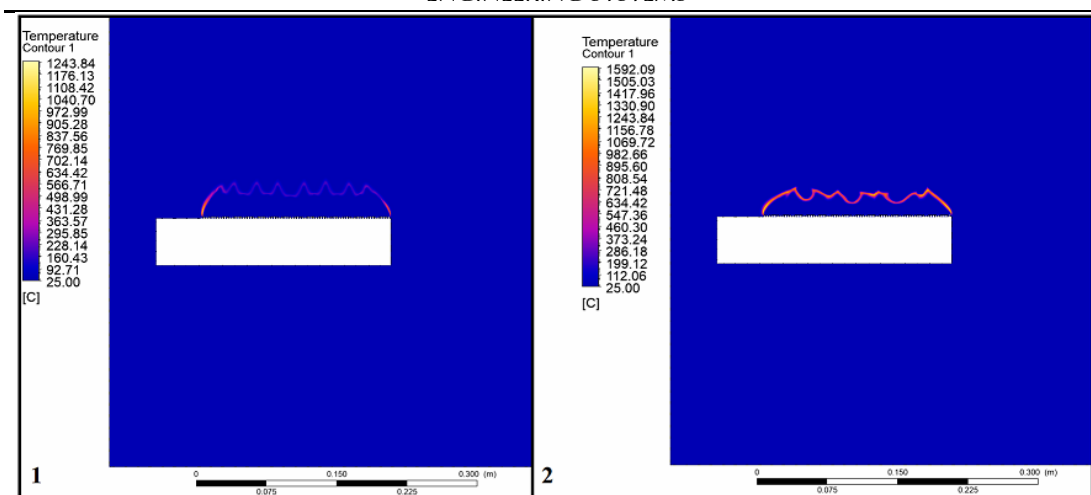


Рис. 2. Графики расчетных зависимостей распределения поля статических температур пламени при диффузионном горении MBTC с воздухом:

- 1 – расчетная зависимость при компонентном составе MBTC $\omega(\text{H}_2) / \omega(\text{CH}_4) = 0.1 / 0.9$;
 2 – расчетная зависимость при компонентном составе MBTC $\omega(\text{H}_2) / \omega(\text{CH}_4) = 0.9 / 0.1$

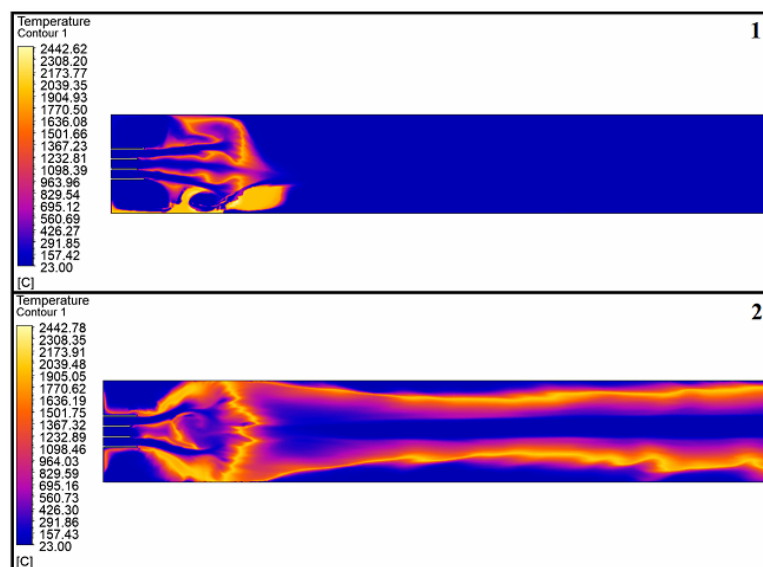


Рис. 3. Графики расчетных зависимостей распределения поля статических температур пламени при кинетическом горении MBTC с воздухом:

- 1 – расчетная зависимость при компонентном составе MBTC $\omega(\text{H}_2) / \omega(\text{CH}_4) = 0.1 / 0.9$;
 2 – расчетная зависимость при компонентном составе MBTC $\omega(\text{H}_2) / \omega(\text{CH}_4) = 0.9 / 0.1$

Как следует из рис. 2, 3, с возрастанием массовой доли водорода возрастают и максимальные значения статических температур факела пламени как для случая диффузионного турбулентного горения, так и для случая кинетического турбулентного горения MBTC с воздухом. Вместе с тем длина факела пламени с увеличением массовой доли водорода в топливной смеси также возрастает, что согласуется с данными работы [1]. Однако при неоднородном смешении исходных компонентов топливной смеси в структуре факела пламени могут возникать локальные зоны с более высокой реакционной способностью, где увеличивается нормальная скорость горения и, как следствие, возрастает тепловыделение. В таковых зонах могут протекать нестационарные режимы горения топливной смеси, что приводит к значительному локальному повышению температуры пламени, а также к случайным колебаниям фронта горения и его фрагментациям (см. рис. 3(1)).

В соответствии с результатами численного моделирования, с возрастанием массовой доли водорода в топливной смеси наблюдается также убывание максимальных значений массовых долей продуктов неполного сгорания метана и CO_2 . Так, при $\omega(\text{H}_2) = 0,1$ – $\omega_{\max}(\text{CO}) = 0,012$, $\omega_{\max}(\text{C}) = 5,7 \cdot 10^{-8}$ и $\omega_{\max}(\text{CO}_2) = 0,12$, а при $\omega(\text{H}_2) = 0,9$ – $\omega_{\max}(\text{CO}) = 6,5 \cdot 10^{-3}$, $\omega_{\max}(\text{C}) = 1,86 \cdot 10^{-9}$ и $\omega_{\max}(\text{CO}_2) = 9,2 \cdot 10^{-3}$ для случая диффузионного горения MBTC с воздухом. При $\omega(\text{H}_2) = 0,1$ – $\omega_{\max}(\text{CO}) = 0,04$, $\omega_{\max}(\text{C}) = 4,9 \cdot 10^{-7}$ и $\omega_{\max}(\text{CO}_2) = 0,12$, а при $\omega(\text{H}_2) = 0,9$ – $\omega_{\max}(\text{CO}) = 7,4 \cdot 10^{-3}$, $\omega_{\max}(\text{C}) = 3,2 \cdot 10^{-9}$ и $\omega_{\max}(\text{CO}_2) = 1,1 \cdot 10^{-2}$ для случая кинетического горения MBTC с воздухом. Представленные результаты хорошо согласуются с данными работы [2]. Кроме того, зарегистрировано с возрастанием массовой доли водорода в топливной смеси увеличение максимального значения массовой доли суммы оксидов азота. Так, при $\omega(\text{H}_2) = 0,1$ – $\omega_{\max}(\text{NO}_x) = 3,1 \cdot 10^{-5}$, а при $\omega(\text{H}_2) = 0,9$ – $\omega_{\max}(\text{NO}_x) = 8,2 \cdot 10^{-5}$ для случая диффузионного горения MBTC с воздухом. При $\omega(\text{H}_2) = 0,1$ – $\omega_{\max}(\text{NO}_x) = 5,7 \cdot 10^{-5}$, а при $\omega(\text{H}_2) = 0,9$ – $\omega_{\max}(\text{NO}_x) = 1,3 \cdot 10^{-4}$ для случая кинетического горения MBTC с воздухом. Поскольку увеличение максимальных значений массовых долей NO_x связано с возрастанием максимальных значений статических температур факела пламени при $\alpha \approx 1$ в случаях как диффузионного, так и кинетического турбулентного горения MBTC с воздухом, то очевидно, что наиболее значимый вклад в увеличение $\omega_{\max}(\text{NO}_x)$ с возрастанием $\omega(\text{H}_2)$ вносят реакции образования термических NO_x , протекающие в высокотемпературных зонах камер сгорания по расширенному механизму Я.Б. Зельдовича. Указанный результат также хорошо согласуется с данными работ [1 – 4].

Закключение. При выполнении теоретического исследования процессов турбулентного диффузионного и кинетического горения MBTC с воздухом в горелочном устройстве малой тепловой мощности (ГГУ-9), а также в горелочном устройстве средней тепловой мощности (ГГВ-10С) получены следующие основные результаты:

- рассмотрена математическая постановка задачи о нестационарном течении многокомпонентной неравновесно реагирующей газовой смеси, замкнутая моделью химической кинетики и дифференциальной моделью турбулентности;
- на основе численного моделирования рассматриваемых процессов показано, что с возрастанием массовой доли водорода в исходной смеси возрастают длина и максимальные значения статических температур факела пламени как для случая диффузионного турбулентного горения, так и для случая кинетического турбулентного горения MBTC с воздухом;
- получено убывание максимальных значений массовых долей продуктов неполного сгорания метана, а также оксида углерода (IV) с возрастанием массовой доли водорода в исходной смеси; однако с увеличением массовой доли водорода в исходной смеси зарегистрировано возрастание максимального значения массовой доли суммы оксидов азота, что связано с интенсификацией реакций образования термических NO_x .

Результаты настоящего исследования могут быть использованы при проектировании малоэмиссионных газовых горелок малой и средней тепловой мощности, а также при разработке мероприятий, направленных на снижение выбросов вредных веществ, образующихся при сгорании MBTC.

Список литературы

1. Лебедева, Е.А. Проблемы сжигания топливных смесей переменного состава / Е.А. Лебедева // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 3–1. – С. 48–53.

2. Малешина, М.А. Математическое моделирование и численное исследование горения топливной смеси метана с водородом / М.А. Малешина, М.И. Корнилова, Р.В. Федоров // Автоматизация процессов управления. – 2025. – № 1 (79). – С. 77–85.
3. Петин, С.Н. Моделирование процессов горения природного газа и водорода / С.Н. Петин, В.С. Королев, А.А. Борисов, А.В. Бурмакина // Промышленная энергетика. – 2022. – № 12. – С. 36–44.
4. Королева, Т.И. Аналитическая оценка основных теплофизических свойств диффузионного ламинарного пламени / Т.И. Королева, Д.В. Столяров, Д.С. Шапошник // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4(53). – С. 140–149.
5. Семенихин, А.С. Кинетические модели горения метановодородных смесей: краткий обзор и их валидация / А.С. Семенихин, С.С. Матвеев, И.В. Чечет [и др.] // Теплоэнергетика. – 2022. – № 10. – С. 79–89.
6. Automatic generation of a kinetic skeletal mechanism for methane-hydrogen blends with nitrogen chemistry / T. Wang, X. Zhang, J. Zhang, X. Hou // Int. J. Hydrogen Energy. – 2018. – V. 43, Is. 6. – P. 3330–3341.
7. Паспорт и руководство по эксплуатации устройства газогорелочного типа ГГУ. – URL: <https://www.c-o-k.ru/library/instructions/lemax/gorelki-gazovye/27790>.
8. Горелка вихревая газовая низкого и среднего давления ГГВ. – URL: https://all-gas.ru/product_list/.
9. Дектерев, Ал.А. Моделирование метановоздушных пламен / Ал.А. Дектерев, Ар.А. Дектерев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2025. – 18(2). – С. 272–294.
10. Yin, C. A new air-fuel WSGGM for better utility boiler simulation, design and optimization / C. Yin // International Conference on Power Engineering. – 2013. – ICOPE 2013.

References

1. Lebedeva, E.A. Problems of combustion of fuel mixtures of variable composition / E.A. Lebedeva // Modern high-tech technologies. – 2019. – No. 3–1. – P. 48–53.
2. Maleshina, M.A. Mathematical modeling and numerical investigation of gorenje fuel mixture of methane with hydrogen / M.A. Maleshina, M.I. Kornilova, R.V. Fedorov // Automation of control processes. – 2025. – No. 1 (79). – P. 77–85.
3. Petin, S.N. Modeling of gorenje processes of natural gas and hydrogen / S.N. Petin, V.S. Korolev, A.A. Borisov, A.V. Burmakina // Industrial power engineering. – 2022. – No. 12. – P. 36–44.
4. Koroleva, T.I. Analytical assessment of the main thermophysical properties of diffusion laminar flame / T.I. Koroleva, D.V. Stolyarov, D.S. Shaposhnik // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 4 (53). – P. 140–149.
5. Semenikhin, A.S. Kinetic models of combustion of methane-hydrogen mixtures: a brief overview and their validation / A. S. Semenikhin, S. S. Matveev, I. V. Chechet [et al.] // Teploenergetika.Gorenje. – 2022. – No. 10. – P. 79–89.
6. Automatic generation of a kinetic frame mechanism for mixtures of methane and hydrogen using nitrogen chemistry / T. Wang, H. Zhang, J. Zhang, H. Hou // Int. J. Hydrogen energy. – 2018. – V. 43, Is. 6. – P. 3330–3341.
7. Passport and operating instructions for gas-burning devices of the GSU type. – URL: <https://www.c-o-k.ru/library/instructions/lemax/gorelki-gazovye/27790>.
8. Low and medium pressure vortex gas burner GGV. – URL: https://all-gas.ru/product_list/.
9. Dekterev, Al.A. Modeling of methane-air flames / Al.A. Dekterev, Ar.A. Dekterev // Journal of Siberian Federal University. un-ta. Engineering and Technology. – 2025. – 18(2). – P. 272–294.
10. Yin, S. The new WSGGM is powered by air fuel to improve the modeling, design and optimization of utility boilers / S. Yin // International Energy Conference. – 2013. – ICOPE 2013.

УДК 628.1

DOI 10.54734/20722958_2025_3_154

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

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Сафронов Максим Александрович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: mksafronov@rambler.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Курносков Николай Ефимович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Транспортные машины»
E-mail: kurnosov-ne@mail.ru

Алексеев Дмитрий Петрович,
ведущий инженер кафедры «Транспортные
машины»
E-mail: alekseev.dim@gmail.com

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

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor
of the Department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Safronov Maxim Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Water Supply, Sewerage and
Hydraulic Engineering»
E-mail: mksafronov@rambler.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
tel.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Kurnosov Nikolay Efimovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Transport Machines»
E-mail: kurnosov-ne@mail.ru

Alekseev Dmitriy Petrovich,
Lead engineer of the department «Transport
Vehicles»
E-mail: alekseev.dim@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАБОТЫ НАПОРНОГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО САТУРАТОРА

С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, Н.Е. Курносков, Д.П. Алексеев

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса работы напорного пневматического сатуратора. Показано, что в процессе обработки водопроводной воды в напорном сатураторе в течение 5 минут при повышении избыточного давления с $\Delta p=0,1$ МПа до $\Delta p=0,4$ МПа в образовавшейся после сброса давления водовоздушной смеси происходит увеличение коэффициента газонаполнения с $\varphi=0,002$ до $\varphi=0,013$, повышение степени пересыщения жидкости с $n=10\%$ до $n=65\%$, увеличение среднего диаметра образовавшихся пузырьков воздуха с $d=86$ мкм до $d=105$ мкм, и их гидравлической крупности с $u_0=7,2$ мм/с до $u_0=10,2$ мм/с. Коэффициент эффективности напорного сатуратора при повышении величины избыточного давления с $\Delta p=0,1$ МПа до $\Delta p=0,4$ МПа увеличивается со значения $\Xi=10,0\%$ до $\Xi=16,2\%$.

Ключевые слова: напорный сатуратор; водовоздушная смесь; коэффициент газонаполнения; степень пересыщения; гидравлическая крупность; максимальная растворимость газа

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PRESSURE PNEUMATIC SATURATOR OPERATION PROCESS

S.Yu. Andreev, M.A. Safronov, N.E. Kurnosov, D.P. Alekseev

The results of experimental studies of the operation process of a pressure pneumatic saturator are presented. It is shown that during the treatment of tap water in a pressure saturator for 5 minutes, when the overpressure increases from $\Delta p=0.1$ MPa to $\Delta p=0.4$ MPa, the gas filling coefficient increases from $\varphi=0.002$ to $\varphi=0.013$ in the air-water mixture formed after pressure relief, and the degree of supersaturation of the liquid increases from $n=10\%$ up to $n=65\%$, an increase in the

average diameter of the formed air bubbles from $d=86$ mcm to $d=105$ mcm, and their hydraulic size from $u_0=7.2$ mm/s to $u_0=10.2$ mm/s. The efficiency coefficient of the pressure saturator increases from $\Delta p=0.1$ MPa to $\Delta p=0.4$ MPa from $E=10.0$ % to $E=16.2$ %.

Keywords: pressure saturator; air-water mixture; gas filling coefficient; degree of supersaturation; hydraulic fineness; maximum gas solubility

В практике очистки производственных сточных вод широкое распространение получил метод напорной флотации, позволяющий эффективно извлекать мелкодисперсные частицы загрязнений в результате их молекулярного прилипания к поверхности всплывающих пузырьков воздуха. На флотируемую мелкодисперсную частицу загрязнений при приближении к ней всплывающего пузырька воздуха действуют две основные силы:

1. Кулоновская сила отталкивания, возникающая вследствие электростатического взаимодействия двойных электрических слоев, образующихся на поверхностях пузырька воздуха и дисперсной частицы загрязнения.

2. Сила ближнего гидродинамического взаимодействия движущихся навстречу друг другу пузырька воздуха и флотируемой частицы.

Силы инерции в процессе флотационного извлечения из сточных вод мелкодисперсных частиц имеют незначительную величину и их значением при рассмотрении элементарного акта взаимодействия пузырька и частицы можно пренебречь.

Флотационная очистка сточных вод происходит в результате протекания одной из разновидностей процессов гетерокоагуляции. Гетерокоагуляция – процесс слипания двух существенно отличающихся друг от друга дисперсных частиц, имеющих различные размеры, отличающихся друг от друга по своей природе и имеющих различные величины электрокинетических потенциалов. В соответствии с теорией гетерокоагуляции, разработанной Дерягиным Б.В., сила кулоновского отталкивания, возникающая между разнородными частицами, имеющими одинаковые знаки зарядов и различные их величины, зависит только от величины заряда частицы, имеющей меньший электрокинетический потенциал [1]. В гетерогенной системе «пузырек воздуха – дисперсная частица», как правило, меньшую величину электрокинетического потенциала ($\zeta=10-20$ мВ) имеет поверхность всплывающего пузырька воздуха [2]. При приближении к поверхности дисперсной частицы всплывающего пузырька воздуха величина силы ближнего гидродинамического взаимодействия в большинстве случаев превышает значение силы кулоновского отталкивания, вследствие чего расстояние между поверхностями частицы и пузырька сокращается до величины порядка 10 А. Возникающая в этом случае сила Ван-дер-Ваальса (сила молекулярного притяжения) обеспечивает прилипание частицы загрязнения к пузырьку.

В диссертационной работе Н.Н. Рулева приводится следующая формула, позволяющая определить величину константы скорости извлечения дисперсных частиц в процессе флотации монодисперсных систем:

$$K = \frac{3}{2} \frac{q_v E}{d_n}, \text{ c}^{-1}, \quad (1)$$

где q_v – объем воздуха, проходящего в единицу времени через единицу поперечного сечения флотационного объема, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; d_n – величина среднего диаметра пузырьков воздуха во флотационном объеме, м; E – коэффициент эффективности захвата флотируемой частицы пузырьком воздуха.

Для стоксовского режима всплывания пузырька воздуха величина коэффициента E может быть определена по формуле

$$E = \frac{3}{2} \left(\frac{d_q}{d_n} \right)^2, \quad (2)$$

где d_q – средний диаметр дисперсных частиц, м.

Одной из основных характеристик водовоздушной смеси во флотационном объеме является величина коэффициента газонаполнения [3]

$$\varphi = \frac{W_B}{W_{CM}} = \frac{W_B}{W_B + W_{Ж}}, \quad (3)$$

где W_B , $W_{Ж}$, W_{CM} – соответственно объемы воздуха, воды и общий объем водовоздушной смеси, m^3 .

С учетом формул

$$q_B = \frac{Q_B}{\omega_{\Phi}}, \quad m^3/(m^2 \cdot c); \quad (4)$$

$$T_B = \frac{H_{\Phi}}{v_{\Pi}}, \quad c; \quad (5)$$

$$W_{\Phi} = H_{\Phi} \omega_{\Phi}, \quad m^3; \quad (6)$$

$$W_B = \varphi W_{\Phi}, \quad m^3, \quad (7)$$

где ω_{Φ} – площадь поперечного сечения флотационного объема, m^2 ; T_B – продолжительность периода пребывания воздуха во флотационном объеме, c ; H_{Φ} – толщина слоя водовоздушной смеси во флотационном объеме, m ; v_{Π} – средняя скорость коллективного всплывания пузырьков воздуха во флотационном объеме, m/c ; Q_B – расход воздуха, проходящего через флотационный объем, m^3/c .

Величина q_B может быть определена по формуле

$$q_B = \frac{Q_B}{\omega_{\Phi}} = \frac{W_{\Phi} \varphi}{T_B \omega_{\Phi}} = \frac{H_{\Phi} \omega_{\Phi} \varphi}{T_B \omega_{\Phi}} = \frac{H_{\Phi}}{T_B} \varphi = v_{\Pi} \varphi, \quad m/c. \quad (8)$$

При ламинарном режиме всплывания пузырьков воздуха, приняв допущение о том, что коэффициент кинематической вязкости водовоздушной смеси ν_{CM} приблизительно равен величине кинематической вязкости воды $\nu_{CM} \approx \nu = 1,01 \cdot 10^{-6} m^2/c$, величину средней скорости всплывания пузырьков воздуха можно определить по формуле Стокса

$$v = \frac{g d_{\Pi}^2}{18 \nu} \frac{\rho_{Ж} - \rho_B}{\rho_{Ж}} = 5,38 \cdot 10^5 \cdot d_{\Pi}^2, \quad m/c, \quad (9)$$

где $g=9,8 m/c^2$ – ускорение свободного падения; $\rho_B=1,2 kg/m^3$ и $\rho_{Ж}=998,2 kg/m^3$ соответственно плотности воздуха и воды.

С учетом формул (2), (6) и (7) формула (1) может быть записана в виде

$$K = \frac{3}{2} \frac{q_B}{d_{\Pi}} \frac{3}{2} \left(\frac{d_q}{d_{\Pi}} \right)^2 = \frac{9}{4} \frac{v_{\Pi}}{d_{\Pi}} \left(\frac{d_q}{d_{\Pi}} \right)^2 = \frac{9}{4} \frac{5,38 \cdot 10^5 d_{\Pi}^2 \varphi}{d_{\Pi}} \left(\frac{d_q}{d_{\Pi}} \right)^2 = 1,21 \cdot 10^6 d_q^2 \frac{\varphi}{d_{\Pi}}, \quad c^{-1}. \quad (10)$$

В соответствии с формулой (10) эффективность флотационного извлечения дисперсных частиц диаметром d_q повышается с увеличением значения коэффициента газонаполнения водовоздушной смеси во флотационном объеме φ и при уменьшении среднего диаметра образующихся пузырьков воздуха d_{Π} (повышении степени дисперсности водовоздушной смеси). При одинаковом значении $q_B, m^3/(m^2 \cdot c)$ величина коэффициента газонаполнения флотационного объема повышается при снижении значения средней скорости коллективного всплывания пузырьков воздуха $v, m/c$ (уменьшении среднего диаметра пузырьков d_{Π}, m).

Основными элементами схемы напорной флотационной очистки сточных вод являются напорный резервуар (сатуратор), предназначенный для насыщения обраба-

тываемых сточных вод атмосферным воздухом при повышенном давлении ($p_a + \Delta p$), и флотационный резервуар (флотатор), в котором происходит формирование флотоагрегаторов «дисперсная частица – пузырек воздуха», имеющих повышенную отрицательную величину гидравлической крупности u , мм/с, и их отделение из объема очищаемых сточных вод.

В соответствии с законом Генри максимально возможное количество растворенного в жидкости газа (концентрация насыщения) $c_{\text{нр}}$, кг/м³, при определенной температуре t , °С, пропорционально величине его парциального давления над раствором p , Па:

$$c_{\text{нр}} = k_r \cdot p, \text{ кг/м}^3. \quad (11)$$

Из формулы (11) имеем

$$c_{\text{нр}} = c_{\text{на}} \frac{p_a + \Delta p}{p_a}, \text{ кг/м}^3, \quad (12)$$

где $c_{\text{на}}$ – максимальная растворимость газа в жидкости при атмосферном давлении $p_a = 0,1 \cdot 10^6$ Па и температуре t , °С; Δp – избыточное давление газа над поверхностью жидкости в сатураторе, Па.

Для воздуха величина максимально возможной его растворимости в чистой воде при давлении $p_a = 10^5$ Па и температуре $t = 20$ °С составляет $c_{\text{на}} = 0,0236$ кг/м³ (г/л).

Насыщенный воздухом в сатураторе при повышенном давлении ($p_a + \Delta p$) водный раствор подается во флотационный объем через дросселирующее устройство, в результате чего его давление понижается до значения p_a , раствор воздуха в воде становится пересыщенным, и из него выделяются мелкодисперсные пузырьки газа. Условием выделения пузырьков воздуха из пересыщенного раствора является наличие дополнительной поверхностной энергии вновь образующейся границы раздела фаз «вода – воздух», что существенно замедляет протекание этого процесса. Возникновение в объеме пересыщенного раствора устойчивых зародышевых пузырьков, не склонных к последующему растворению в воде, возможно только в процессе спонтанной локальной флуктуации концентрации растворенного газа в некотором малом объеме раствора, в результате чего возникает локальное скопление достаточно большого числа молекул новой газовой фазы в жидкости. Процесс выделения из пересыщенного раствора зародышевых пузырьков существенно интенсифицируется при наличии в растворе микровключений, выступающих в роли центров образования новой фазы. После образования устойчивого зародыша газового пузырька в пересыщенном растворе в результате процесса молекулярной диффузии газ поступает из раствора в объем пузырька, и он начинает активно расти до тех пор, пока пересыщение не исчезнет. Таким образом, процесс выделения воздуха из пересыщенного водного раствора, сформированного в сатураторе, состоит из двух стадий:

- 1) возникновение в пересыщенном растворе зародышевых пузырьков воздуха;
- 2) рост образовавшихся зародышевых пузырьков.

Первая из этих стадий термодинамически затруднена и требует дополнительной энергии на образование новой поверхности раздела фаз «вода – воздух». Вторая стадия протекает самопроизвольно со значительным убыванием энергии Гиббса. Поскольку первая стадия выделения газообразной фазы из пересыщенного раствора затруднена, число образующихся зародышевых пузырьков ограничено, и с ростом пересыщения жидкости газом диаметр образующихся пузырьков имеет тенденцию к увеличению.

На рис. 1 представлены полученные Л.И. Шмидтом и В.В. Кносетовым графики распределения размеров пузырьков азота в воде, образующихся при различной степени пересыщения раствора.

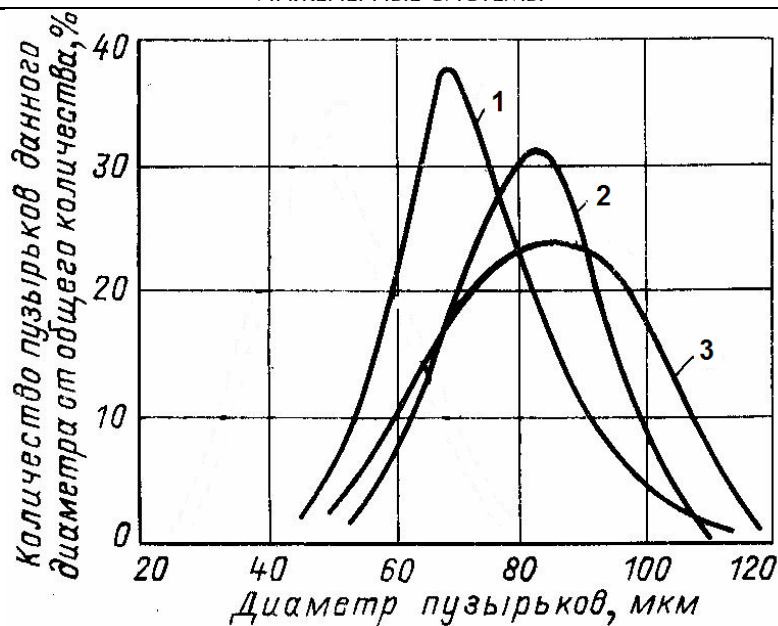


Рис. 1. Графики распределения размеров пузырьков азота в воде, образующихся при различной степени пересыщения раствора:
1-3 – соответственно 400, 500, 800 %

Из рис. 1 следует, что среднестатистические размеры образующихся газовых пузырьков с увеличением степени пересыщения водного раствора увеличиваются. При повышении степени пересыщения раствора наблюдается расширение спектра дисперсности образующихся пузырьков. Распределение образующихся газовых пузырьков по их размерам при всех значениях величин пересыщения близко к нормальному.

В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства были проведены исследования зависимости свойств водовоздушной смеси, полученной на лабораторной установке, от величины степени пересыщения водного раствора. Схема лабораторной установки представлена на рис. 2. Общий вид лабораторной установки показан на рис. 3.

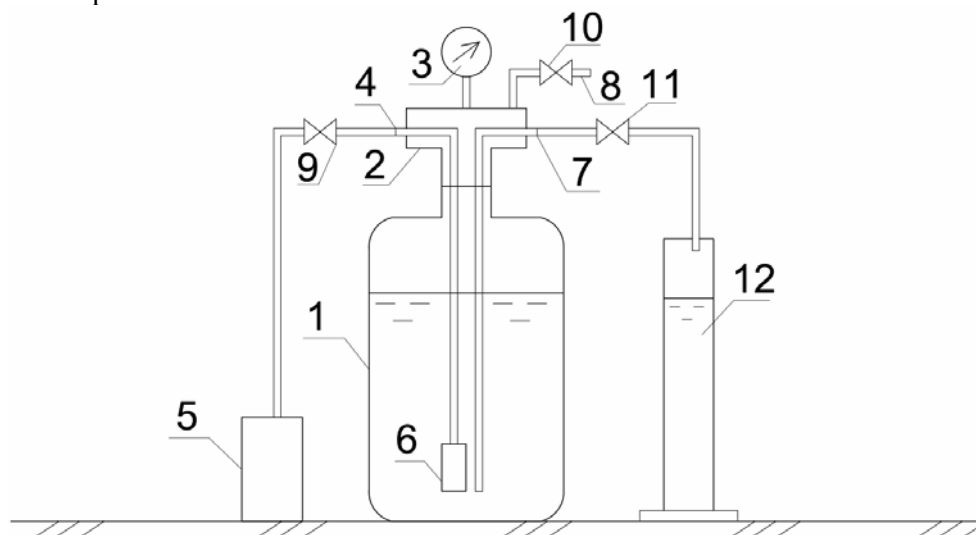


Рис. 2. Схема лабораторной установки для получения водовоздушной смеси методом декомпрессии насыщенного водного раствора:

1 – корпус сатуратора; 2 – головка сатуратора; 3 – манометр; 4 – трубопровод подачи в сатуратор сжатого воздуха; 5 – компрессор; 6 – диспергатор воздуха; 7 – трубопровод отвода из сатуратора водного раствора; 8 – патрубок для сброса нерастворившегося воздуха; 9, 10, 11 – вентили; 12 – мерный цилиндр



Рис. 3. Общий вид лабораторной установки для получения водовоздушной смеси методом декомпрессии насыщенного водного раствора

Лабораторная установка включает в себя напорный сатуратор 1, компрессор 5 и мерный цилиндр емкостью 250 миллилитров. На корпус сатуратора 1 навинчивалась головка 2, на которой смонтированы манометр 3, трубопровод подачи в сатуратор сжатого воздуха 4, трубопровод отвода из сатуратора водного раствора 7 и патрубок для сброса нерастворившегося воздуха 8. Трубопровод подачи в сатуратор сжатого воздуха присоединен к компрессору 5, и на нем установлен мелкопористый керамический диспергатор 6.

Лабораторная установка работала следующим образом. В сатуратор заливался заданный объем водопроводной воды, и на него накручивалась головка. Включался компрессор 5, и через объем воды, находящейся в сатураторе 1, пропусклись пузырьки воздуха, сформированные на диспергаторе 6. Вентилем 10, установленным на патрубке для сброса нерастворившегося воздуха 8, поддерживалась заданная величина избыточного давления Δp , значение которого контролировалось манометром 3. Насыщение водопроводной воды под избыточным давлением Δp производилось в течение 5 минут, после чего вентиль 10 закрывался, и компрессор 5 отключался. Вентиль 11, установленный на трубопроводе 7, открывался, и насыщенный воздух под избыточным давлением Δp водный раствор переливался в мерный цилиндр 12. В результате сброса давления, при котором производилось насыщение воды воздухом со значения $(\Delta p + p_a)$ до величины давления p_a , водный раствор становился пересыщенным, и из него выделялись пузырьки воздуха.

На рис. 4 представлены общие виды водовоздушной смеси, полученной при величине избыточного давления в сатураторе 0,2, 0,3 и 0,4 МПа.

Величина коэффициента газонаполнения образовавшейся в результате пересыщения водного раствора водовоздушной смеси имеет значение

$$\varphi = \frac{H_{\text{см}} - H_{\text{ж}}}{H_{\text{см}}}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (13)$$

где $H_{\text{см}}$ – высота слоя водовоздушной смеси в мерном цилиндре; $H_{\text{ж}}$ – высота слоя жидкости в мерном цилиндре после отделения из неё всех пузырьков воздуха.

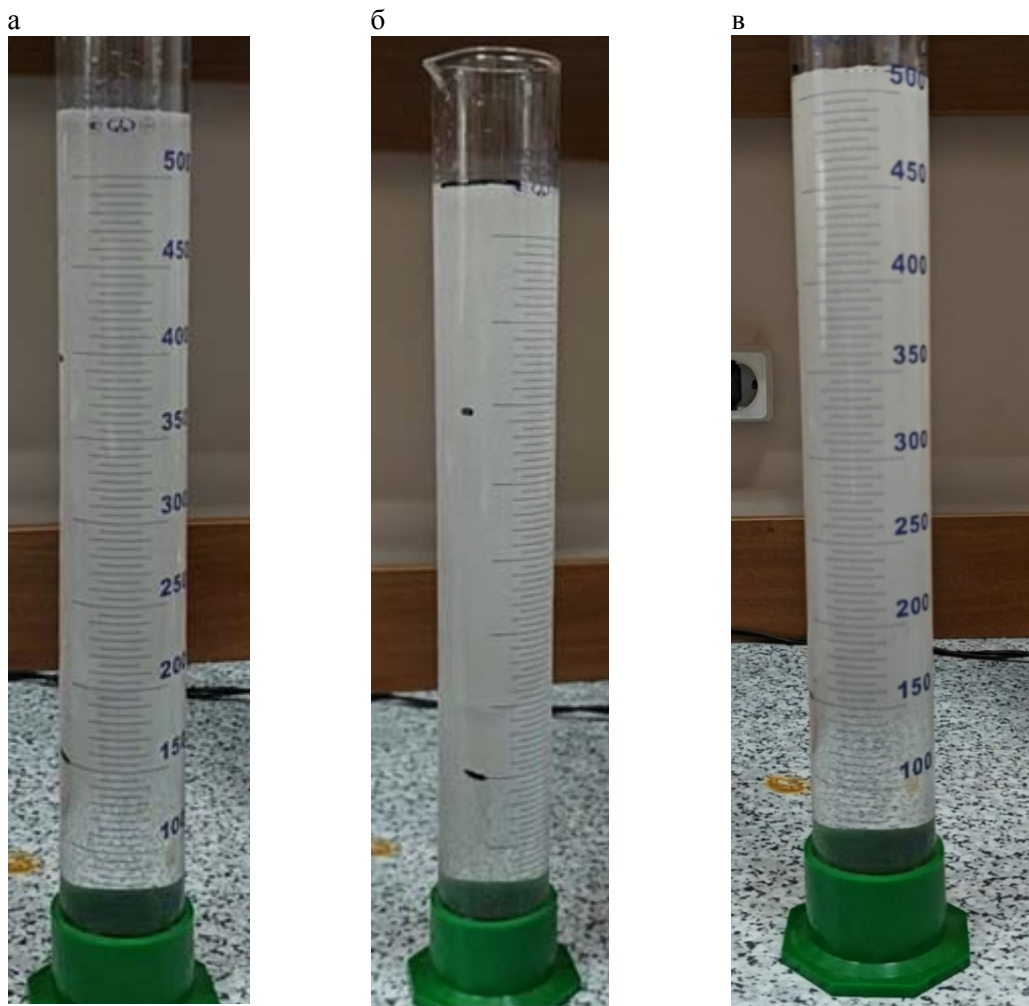


Рис. 4. Общие виды водовоздушной смеси, полученной при величине избыточного давления в сатураторе:
а – 0,2 МПа; б – 0,3 МПа; в – 0,4 МПа

Максимальная величина объема воздуха, способного раствориться в воде при температуре $t=20^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении, Па, может быть определена по формуле

$$c_{\text{на}} = \frac{C_{\text{на}}}{\rho_{\text{в}}} = \frac{0,0236}{1,2} = 0,02 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (14)$$

Теоретическая величина максимального значения объемной концентрации воздуха в водовоздушной смеси после сброса давления может быть определена по формуле

$$c_{\text{нр}} = c_{\text{на}} \frac{p_{\text{а}} + \Delta p}{p_{\text{а}}} - c_{\text{на}} = c_{\text{на}} \left(\frac{p_{\text{а}} + \Delta p}{p_{\text{а}}} - 1 \right) \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (15)$$

Степень пересыщения жидкости газом в сатураторе имеет значение

$$n = \frac{\Phi}{c_{\text{на}}} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Коэффициент эффективности работы сатуратора имеет значение

$$\Xi = \frac{\Phi}{c_{\text{нр}}} \cdot 100\%. \quad (17)$$

Средняя величина гидравлической крупности пузырьков воздуха в водовоздушной смеси u_0 , мм, может быть определена как отношение толщины слоя водовоздушной

смеси $H_{\text{см}}$, мм, к продолжительности всплывания фронта раздела фаз «водовоздушная смесь – жидкость» в мерном цилиндре T , с:

$$u_o = \frac{H_{\text{см}}}{T}, \text{ мм/с.} \quad (18)$$

В соответствии с рекомендациями, приводимыми в работе С.М. Липатова «Физико-химия коллоидов», величина кинематического коэффициента вязкости водовоздушной смеси может быть определена по формуле

$$\nu_{\text{см}} = \nu_{\text{ж}} \frac{1 + 4,5\varphi}{1 - \varphi}, \text{ м}^2/\text{с.} \quad (19)$$

Величина среднего диаметра пузырьков воздуха d , м, всплывающих в водовоздушной смеси, имеющей коэффициент вязкости $\nu_{\text{см}}$, м²/с, со скоростью ν , м/с, может быть получена по формуле Стокса:

$$\nu = \frac{gd^2}{18\nu_{\text{см}}} \frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{ж}}} = \frac{9,8d^2}{18\nu_{\text{см}}} \cdot \frac{998,2 - 1,2}{998,2} = 0,544 \frac{d^2}{\nu_{\text{см}}}, \quad (20)$$

откуда

$$d = \sqrt{1,838(u_o \cdot 10^{-3})\nu_{\text{см}}}, \text{ м.} \quad (21)$$

В таблице приведены технологические характеристики водовоздушной смеси, полученной при различных величинах избыточного давления в сатураторе Δp , МПа.

Технологические характеристики водовоздушной смеси,
полученной при различных величинах избыточного давления в сатураторе Δp , МПа

Наименование показателя	Величина показателя						
Избыточное давление Δp , МПа	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Коэффициент газонаполнения водовоздушной смеси φ , мл/мл	0,002	0,003	0,005	0,007	0,009	0,011	0,013
Теоретическая величина максимальной объемной концентрации воздуха в водовоздушной смеси после сброса давления $c_{\text{нр}}$, мл/мл	0,020	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080
Степень пересыщения жидкости газом n , %	10	15	25	35	45	55	65
Коэффициент эффективности работы сатуратора Ξ , %	10,0	10,0	12,5	14,0	15,0	15,7	16,3
Средняя величина гидравлической крупности пузырьков воздуха в водовоздушной смеси u_o , мм/с	7,2	7,8	8,3	8,7	9,3	9,7	10,2
Величина кинематического коэффициента вязкости водовоздушной смеси $\nu_{\text{см}}$, м ² /с $\cdot 10^{-6}$	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
Средний диаметр пузырьков воздуха водовоздушной смеси d , мкм	116	122	126	130	135	138	142

Проведенные исследования свойств водовоздушной смеси, полученной методом декомпрессии насыщенного водного раствора, позволили установить, что в процессе обработки водопроводной воды в напорном сатураторе в течение 5 минут при повышении избыточного давления со значения $\Delta p=0,1$ МПа до $\Delta p=0,4$ МПа в образовавшейся после сброса давления водовоздушной смеси происходит следующее:

– коэффициент газонаполнения увеличивается с $\varphi=0,002$ до $\varphi=0,013$;

- степень пересыщения жидкости повышается с $n=10\%$ до $n=65\%$;
- средний диаметр пузырьков воздуха изменяется с $d=116$ мкм до $d=142$ мкм;
- коэффициент эффективности напорного сатуратора возрастает с $\Theta=10,0\%$ до $\Theta=16,3\%$.

Список литературы

1. Алексеев, Е.В. Основы технологии очистки сточных вод флотацией / Е.В.Алексеев. – Москва : АСВ, 2009. – 136 с.
2. Алексеев, Е.В. Физико-химическая очистка сточных вод / Е.В. Алексеев. – Москва : АСВ, 2009. – 248 с.
3. Калицун, В.И. Лабораторный практикум по водоотведению и очистке сточных вод / Е.В. Алексеев. – Москва : Стройиздат, 2000. – 272 с.

References

1. Alekseev, E.V. Fundamentals of wastewater treatment technology by flotation / E.V. Alekseev. – Moscow : ACU, 2009. – 136 p.
2. Alekseev, E.V. Physico-chemical wastewater treatment / E.V. Alekseev. – Moscow : ACU, 2009. – 248 p.
3. Kalitsun, V.I. Laboratory practice on wastewater disposal and treatment / E.V. Alekseev. – Moscow : Stroyizdat, 2000. – 272 p.

УДК 697.1

DOI 10.54734/20722958_2025_3_163

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

Фролов Михаил Владимирович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: mihail-frolovv@yandex.ru

Курдин Андрей Владимирович,
аспирант кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: andreyka.kurdin@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

Frolov Mikhail Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Heat, Gas Supply and
Ventilation»
E-mail: mihail-frolovv@yandex.ru

Kurdin Andrey Vladimirovich,
Postgraduate student of the department «Heat,
Gas Supply and Ventilation»
E-mail: andreyka.kurdin@bk.ru

ОЦЕНКА ТЕПЛОПOTЕРЬ ЧЕРЕЗ НАРУЖНЫЕ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОДВАЛОВ

М.В. Фролов, А.В. Курдин

Проанализированы изменения в методике оценки теплотерь через наружные ограждения, контактирующие с грунтом, представленной в СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий». На примере расчетной модели отапливаемого подвала жилого здания оценено влияние глубины и ширины подвала на необходимую толщину теплоизоляционного слоя. Определено, через какие элементы полов по грунту происходят наибольшие теплотери при различной глубине и ширине подвала здания. Установлено, что при расчетах с использованием метода однородных зон для отапливаемых подвалов зданий, стены и пол которых контактируют с грунтом, необходимая толщина теплоизоляционного слоя значительно превышает фактически необходимую.

Ключевые слова: подвал, стены в грунте, полы по грунту, теплотери, отопление, теплотехническая неоднородность

ASSESSMENT OF HEAT LOSS THROUGH EXTERNAL ENCLOSING STRUCTURES OF HEATED BASEMENTS

M.V. Frolov, A.V. Kurdin

The changes in the methodology (presented in SP 50.13330.2024 «Thermal Protection of Buildings») for assessing heat loss through external enclosures which contact with the ground are analyzed. Using the example of a calculation model of a heated basement of a residential building, the influence of the depth and width of the basement on the required thickness of the thermal insulation layer is assessed. It is determined through which elements of floors on the ground the greatest heat loss occurs at different depths and widths of the basement of the building. It is established that calculations using the homogeneous zone method for heated basements of buildings, the walls and floor of which are in contact with the ground, the required thickness of the thermal insulation layer significantly exceeds the actually required one.

Keywords: basement, walls in the ground, floors on the ground, heat loss, heating, thermal inhomogeneity

Разработка новых и совершенствование существующих методов для снижения потребления тепловой энергии системами обеспечения микроклимата зданий является важной задачей российской экономики [1, 2]. С целью уменьшения потребления энергоресурсов системами отопления зданий в зимний период в последние годы существенно ужесточаются требования к тепловой защите их наружных ограждений [3, 4].

При этом важно правильно оценивать возможности по энергосбережению в отапливаемых или неотапливаемых подвалах зданий, стены и полы которых контактируют с грунтом. За последнее время проведено значительное количество исследований, посвященных оценке влияния грунта на теплозащитные качества наружных ограждений [5–7]. Необходимо проанализировать изменения в методике оценки теплопотерь через наружные ограждения, контактирующие с грунтом, представленные в обновленной нормативной документации. В 2019 году Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации были изданы методические рекомендации по расчету теплопотерь и приведенного сопротивления теплопередаче элементов здания, контактирующих с грунтом. В данных рекомендациях содержится описание трех методик, позволяющих проводить расчет потерь тепла через ограждения, контактирующие с грунтом:

- метод однородных зон (МОЗ);
- аналитический метод расчета (АМР);
- метод нестационарных температурных полей (МНТП).

МОЗ является наиболее простым, и в 2022 году с использованием данного метода были актуализированы СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», и эти изменения были закреплены в СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий».

Ранее базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче наружных ограждений $R_0^{\text{тп}}$, контактирующих с грунтом, в нормах строго не прописывалось. В настоящее время для стен в грунте и полов по грунту установлены те же требования, что и для ограждений, контактирующих с воздухом. Для учета влияния грунта полы и стены здания делили на 4 зоны. При наличии стен, расположенных ниже уровня земли, отсчет зон начинали на стенах и продолжали по полам, ширина первых трех зон принималась равной 2 м, ширина IV зоны не регламентировалась. Значения сопротивления теплопередаче отдельных зон $R_{\text{пл}}^i$ составляли соответственно 2,1; 4,3; 8,6 и 14,2.

В обновленной нормативной литературе расчет стен и полов разделили, уточнили базовые сопротивления теплопередаче зон для стен $R_{\text{бсi}}$ в грунте и полов по грунту $R_{\text{псi}}$ и добавили возможность учесть теплофизические характеристики грунта. Также добавили возможность учесть потери тепла через различные теплотехнические неоднородности, характерные для стен в грунте и полов по грунту. Для определения приведенного сопротивления теплопередаче стен в грунте или полов по грунту в действующей нормативной документации предложена следующая формула:

$$R^{\text{тп}} = \frac{A}{\frac{A_I}{R_I} + \frac{A_{II}}{R_{II}} + \frac{A_{III}}{R_{III}} + \frac{A_{IV}}{R_{IV}} + \Psi_i L_i}, \quad (1)$$

где A – площадь стен в грунте или полов по грунту, м^2 ; $A_I, A_{II}, A_{III}, A_{IV}$ – площадь первой, второй, третьей и четвертой зон стен в грунте или полов по грунту, м^2 ; $R_I, R_{II}, R_{III}, R_{IV}$ – сопротивления теплопередаче первой, второй, третьей и четвертой зон стен в грунте или полов по грунту, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; Ψ_i – удельные потери теплоты через теплотехническую неоднородность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; L_i – длина теплотехнической неоднородности, м.

Сопротивление теплопередаче отдельных зон R_i определяют по формуле

$$R_i = \frac{1,6}{\lambda_{\text{гр}}} R_{\text{бсi}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{бсi}}$ – базовое сопротивление теплопередаче стен в грунте или полов по грунту, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $\lambda_{\text{гр}}$ – теплопроводность грунта, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; $\delta_{\text{ут}}$ – толщина дополнительного

утепляющего слоя; λ_{yt} – теплопроводность материала дополнительного утепляющего слоя, Вт/(м·°C).

Проанализируем существующие требования к теплозащите ограждающих конструкций подвала на примере модели жилого здания, которое в плане имеет форму квадрата. Расчетная схема подвала здания представлена на рис. 1.

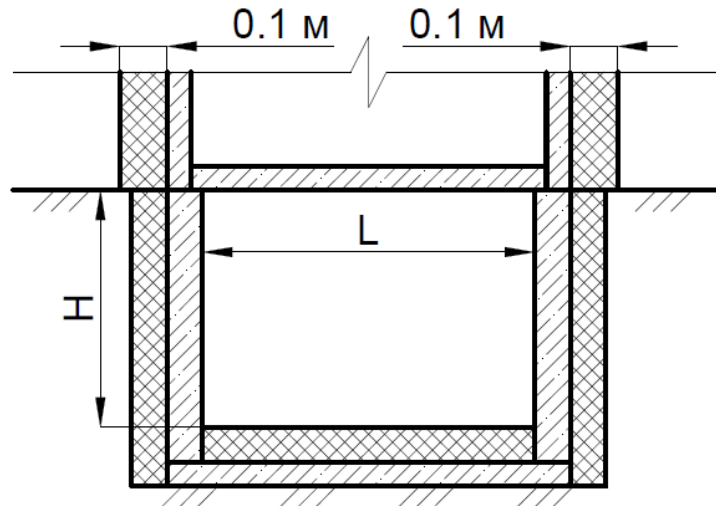


Рис. 1. Расчетная схема подвала

Расчетные параметры внутреннего воздуха приняты следующими: температура $t_{в}=18\text{ }^{\circ}\text{C}$; относительная влажность $\phi_{в}=55\%$. Расчетные параметры наружного воздуха приняты согласно действующим нормативным документам для города Пензы: средняя температура отопительного периода $t_{оп}=-3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$; продолжительность отопительного периода $z_{оп}=201$ сут; зона влажности – сухая.

В городе Пензе для жилых зданий базовые значения требуемого сопротивления теплопередаче для стен в грунте $R_0^{тр}$ равно $2,94\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, для полов по грунту $R_0^{тр}$ равно $3,88\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. В качестве основного материала в расчетной схеме использован монолитный железобетон толщиной $0,2\text{ м}$ с теплопроводностью $\lambda=1,92\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$. В качестве теплоизолирующего слоя использован экструзионный пенополистирол с теплопроводностью $\lambda=0,035\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$. Теплопроводность грунта $\lambda_{гр}$ приняли соответствующей базовому расчетному значению, равному $1,6\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$.

Определим приведенное сопротивление теплопередаче $R^{пр}$ стен в грунте или полов по грунту для различных значений глубины подвала H и ширины подвала L . Подберем минимально допустимую толщину теплоизолирующего слоя δ_{yt} для рассчитываемых ограждающих конструкций.

При расчете наружных стен в грунте учтены два вида неоднородностей:

– стык стены вне грунта со стеной в грунте, при этом толщина утеплителя для наружной стены надземной части здания принята равной $0,1\text{ м}$, что соответствует климатическим условиям города Пензы;

– угол стен в грунте, т.к. рассчитываемая модель здания имеет форму квадрата, в расчете учитывались 4 угла.

В расчете для полов по грунту учтен один вид неоднородностей:

– стык стены в грунте с полом в грунте, длину стыка для здания квадратной формы принимали равной $4\cdot L$.

В ходе работы оценивали требования по теплозащите при H , равной $2, 4$ и 8 м . Разделение на зоны для стен в грунте велось полосами высотой 2 м . Соответственно при $H=2\text{ м}$ в расчете учитывали только первую зону, при $H=4\text{ м}$ учитывали первую и вторую зоны, при $H=8\text{ м}$ учитывали все четыре зоны. При делении пола по грунту в соответствии с действующей нормативной документацией по контуру здания добав-

ляли эффективную полосу. Данная полоса необходима для учёта влияния высоты наружных стен по грунту при делении пола по грунту на зоны. Схема деления полов по грунту на зоны представлена на рис. 2.

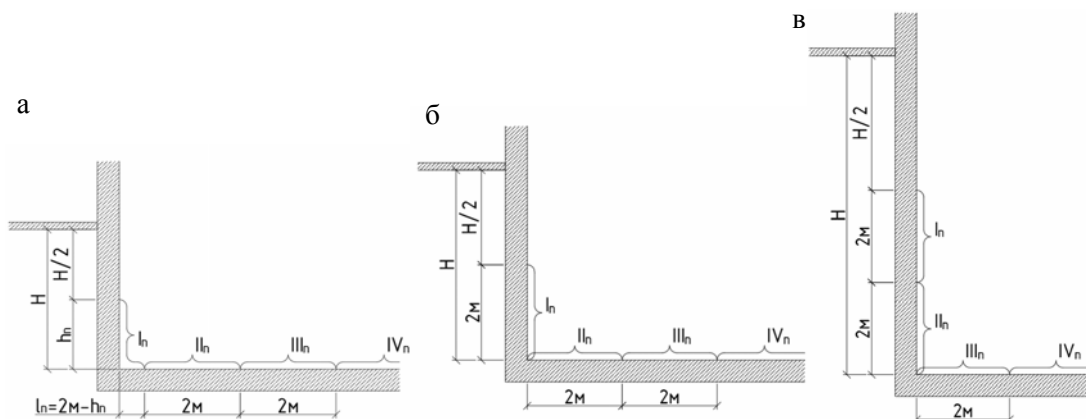


Рис. 2. Схема деления на зоны полов по грунту при глубине подвала:
а – 2 м; б – 4 м; в – 8 м

Важно отметить, что в нормативной документации четко не прописано, необходимо ли учитывать площадь эффективной полосы при расчете по формуле (1). Однако было установлено, что при расчетах с использованием теплотехнического калькулятора компании «Технонколь» площадь эффективной полосы учитывается в формуле (1). Согласно письму НИИСФ РААСН, алгоритм работы данного калькулятора соответствует методике СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий». Поэтому в ходе расчетов площадь эффективной полосы также учитывали в формуле (1).

Ширину подвала L варьировали от 4 до 36 м. Таким образом, площади пола подвалов рассматриваемых зданий изменялись от 16 до 1296 м², что позволило в ходе расчетов охватить наиболее часто встречающиеся при строительстве площади отапливаемых подвалов зданий. Результаты расчетов при глубине подвала H , равной 2 м, представлены на рис. 3.

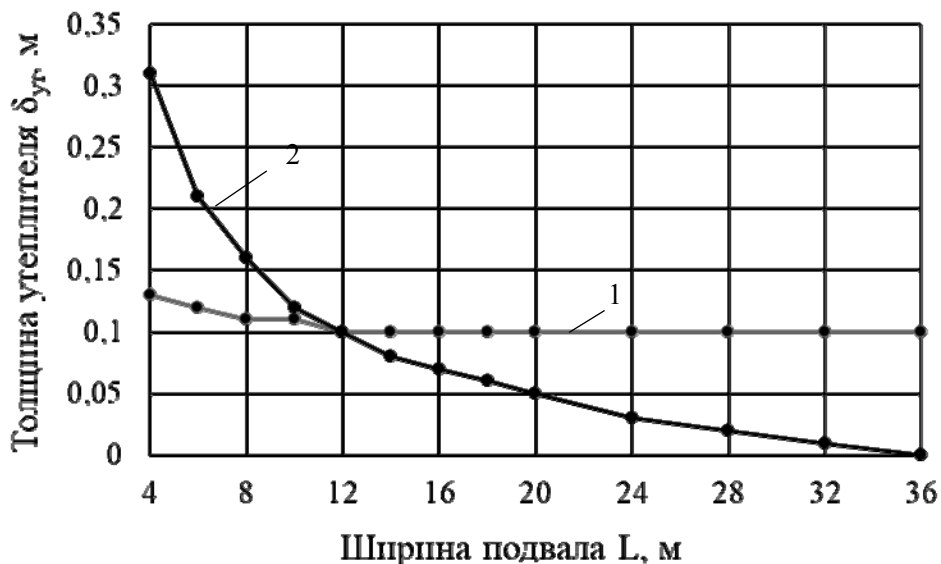


Рис. 3. Минимально допустимая толщина утеплителя $\delta_{ут}$:
1 – стены в грунте; 2 – полы по грунту

С увеличением L уменьшается необходимая толщина утеплителя для наружных стен, что связано со снижением влияния тепловых потерь через стык углов стен в грунте. При $L=12$ м необходимая толщина утеплителя для стены становится равной 0,1 м и при дальнейшем увеличении ширины подвала не изменяется. Таким образом,

при $H=2$ м толщина утеплителя близка к толщине утеплителя, которая была бы у стены такой же конструкции, но расположенной выше уровня земли.

Необходимая толщина утеплителя полов по грунту в большей степени зависит от L , и при $L=36$ м и более утепление пола подвала не требуется. Важно отметить, что при расчете перекрытия над наружным воздухом, а не полов по грунту, в расчетной модели здания необходимая толщина утеплителя была бы равна 0,15 м. Это меньше, чем минимально допустимая толщина утеплителя полов по грунту при L , равной 4, 6 и 8 м. Таким образом, согласно существующей нормативной документации, при L до 8 м из-за контакта пола с грунтом происходит его охлаждение в большей степени, чем если бы пол контактировал с наружным воздухом с температурой -27 °С. Это не логично, противоречит физике переноса тепла через наружные ограждения, контактирующие с грунтом, и не соответствует многочисленным исследованиям по данной тематике [8, 9].

Для определения причин неточностей в существующей методике расчета проанализируем, через какие элементы полов по грунту в рассматриваемой модели подвала происходят наибольшие теплопотери при различной ширине подвала L (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Доля теплопотерь через различные элементы полов по грунту от общих теплопотерь при $H=2$ м

Ширина подвала L , м	$\frac{A_I}{R_I}$, Вт/°С	$\frac{A_{II}}{R_{II}}$, Вт/°С	$\frac{A_{III}}{R_{III}}$, Вт/°С	$\frac{A_{IV}}{R_{IV}}$, Вт/°С	$\Psi_i L_i$, Вт/°С
4	0,669	0,082	0	0	0,249
6	0,640	0,190	0	0	0,170
8	0,595	0,250	0,027	0	0,128
10	0,559	0,267	0,074	0	0,010
12	0,525	0,270	0,111	0,010	0,084
14	0,502	0,266	0,129	0,032	0,071
16	0,479	0,260	0,139	0,058	0,063
18	0,461	0,254	0,144	0,084	0,057
20	0,447	0,247	0,146	0,110	0,051
24	0,428	0,232	0,143	0,155	0,042
28	0,409	0,219	0,139	0,197	0,036
32	0,395	0,208	0,133	0,232	0,032
36	0,388	0,197	0,127	0,260	0,028

Теплопотери через полы по грунту происходят через первую, вторую зоны и стык стен в грунте с полом при любой ширине подвала. При L , равной 8 м и более, появляется третья зона, при ширине L , равной 12 м и более, – четвертная зона. При этом наибольший вклад в теплопотери вносит первая зона – от 38,8 до 66,9 % от всех теплопотерь. Проанализировав полученные результаты, авторы статьи сделали вывод, что неточность в действующей методике связана с учётом при расчете по формуле (1) в знаменателе площади эффективной полосы. Из-за этого увеличивается значение приведенного сопротивления теплопередаче, и, как следствие, растет толщина утеплителя. Если при делении пола на зоны учитывать эффективную полосу, но при расчете по формуле (1) её не добавлять в знаменатель, толщина утеплителя будет значительно ниже и будет варьироваться от 0,11 м при $L=4$ м до 0 м при $L=24$ м и более. В данном варианте расчетов толщина утеплителя полов по грунту, независимо от L , будет меньше, чем толщина утеплителя в такой же конструкции пола, но контактирующей с наружным воздухом. Это более логично и хорошо соотносится с теплофизическими особенностями данных ограждений.

Были выполнены расчеты при H , равной 4 и 8 м. Результаты расчетов по определению толщины утеплителя при различных глубинах подвала представлены в табл. 2.

Толщина утеплителя при различной ширине и глубине подвала, м

Ширина подвала L , м	Стены в грунте			Полы по грунту		
	Глубина подвала $H=2$ м	Глубина подвала $H=4$ м	Глубина подвала $H=8$ м	Глубина подвала $H=2$ м	Глубина подвала $H=4$ м	Глубина подвала $H=8$ м
4	0,13	0,11	0,08	0,31	0,80	1,11
6	0,12	0,09	0,06	0,21	0,42	1,50
8	0,11	0,09	0,06	0,16	0,29	0,75
10	0,11	0,08	0,05	0,12	0,22	0,50
12	0,1	0,08	0,05	0,10	0,17	0,37
14	0,1	0,07	0,05	0,08	0,14	0,29
16	0,1	0,08	0,05	0,07	0,12	0,23
18	0,1	0,08	0,05	0,06	0,10	0,19
20	0,1	0,07	0,05	0,05	0,08	0,16
24	0,1	0,07	0,05	0,03	0,06	0,12
28	0,1	0,07	0,04	0,02	0,04	0,09
32	0,1	0,07	0,04	0,01	0,03	0,07
36	0,1	0,07	0,04	0,00	0,02	0,05

Необходимая толщина утеплителя для стен в грунте при $H=4$ м варьируется от 0,11 до 0,07 м, при $H=8$ м – от 0,08 до 0,04 м. Таким образом, с увеличением H уменьшается требуемая толщина утеплителя, что связано с добавлением зон с большим сопротивлением теплопередаче. Однако при увеличении глубины подвала возрастает требуемая толщина утеплителя для полов по грунту. Так, при $H=8$ м необходимая толщина теплоизоляции в 2-139 раз выше, чем толщина теплоизоляции при $H=4$ м. При этом при $L=4$ м и $H=4$ м, по расчетам, требуется слой утеплителя толщиной 0,8 м, что больше максимальной толщины теплоизоляционных плит, выпускаемых в России. Полученные результаты не логичны и противоречат теплофизическим особенностям данных ограждений.

Проанализируем, через какие элементы полов по грунту при H , равной 4 и 8 м, происходят наибольшие теплопотери при различных значениях L (рис. 4).

Рассматривая данные, представленные в табл. 1 и на рис. 4, видим, что с увеличением H значительно возрастают потери тепла через стык пола со стеной. Это связано с тем, что в таблице Г.160 СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей» задана линейная зависимость потерь через стык от глубины расположения стыка. По данной таблице увеличение глубины в 2 раза приводит к повышению теплопотерь через стык также в 2 раза. Эта зависимость противоречит теплофизическим особенностям грунта, согласно которым при увеличении глубины подвала теплопотери, наоборот, снижаются. Кроме того, в данной таблице никак не учитывается толщина утеплителя в конструкциях пола по грунту и стен в грунте. Очевидно, что с ростом толщины утеплителя потери через стык пола со стеной должны падать. Из-за этого в расчетах при $L=4$ м и $H=8$ м требуемая толщина утеплителя составила 111 м.

Также не учитывается толщина утеплителя для узла, описывающего тепловые потери через угол стен в грунте и представленного в таблице Г161 СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей». Этот узел требует доработки в части учёта влияния теплофизических качеств утеплителя на теплопотери.

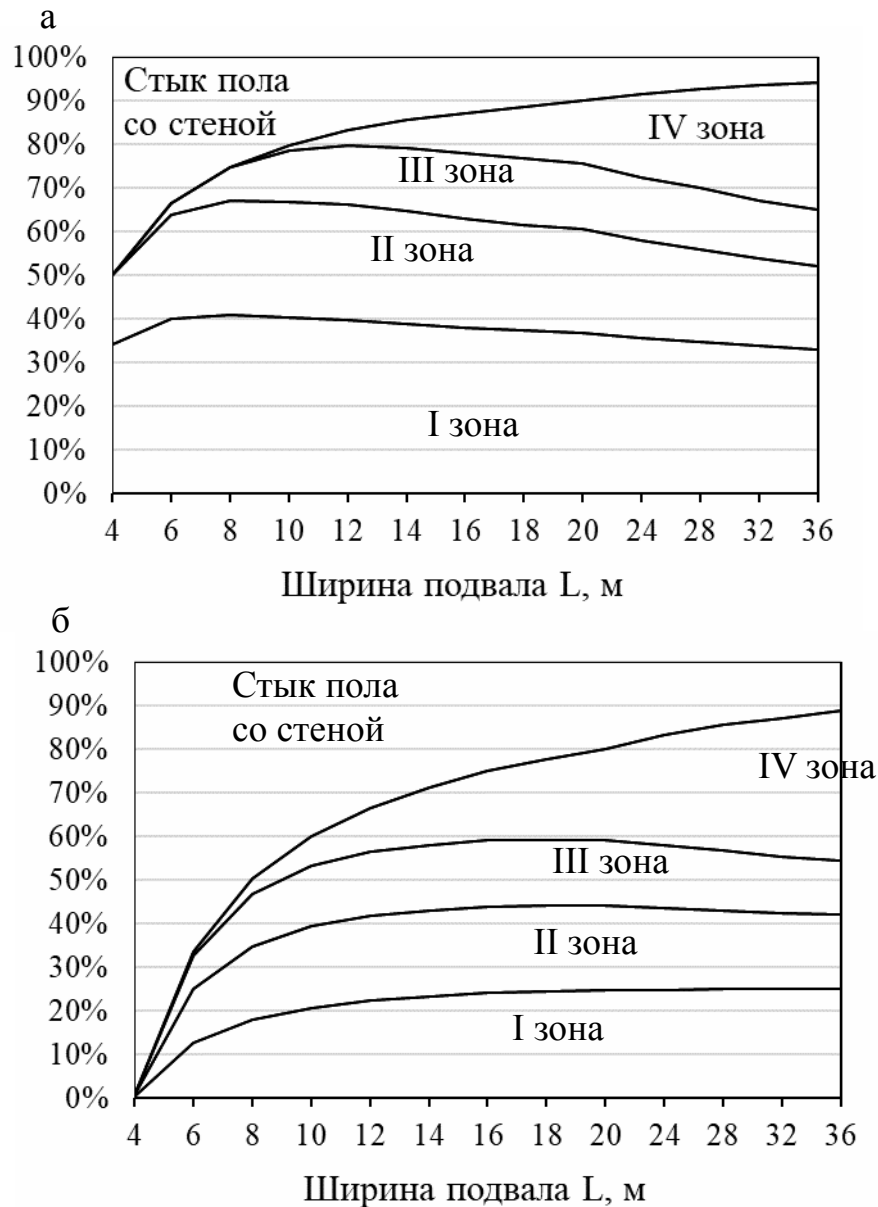


Рис. 4. Теплотери через различные элементы полов по грунту при глубине подвала:
а – $H=4$ м; б – $H=8$ м

Все проведенные расчеты были продублированы с использованием теплотехнического калькулятора компании «Технониколь». Результаты расчетов в данном калькуляторе хорошо соотносятся с результатами расчетов, выполненных авторами. В случаях, когда, по расчету, толщина утеплителя превышала 0,39 м, программа выдает следующую ошибку «Нормируемое значение теплосопротивления путем подбора толщины теплоизолятора не достигнуто. Улучшите теплотехнические параметры на шагах «Конструкция» и «Характеристики конструкции»». Таким образом, для зданий квадратной формы с глубиной подвала 4 м и шириной 4 и 6 м, а также для зданий с глубиной подвала 8 м и шириной 4, 6, 8 и 10 м при расчетах с использованием данного калькулятора невозможно подобрать необходимую толщину утеплителя, т.к. расчетная толщина утеплителя превышает 0,4 м.

Исследования проводились на примере здания квадратной формы. Для зданий прямоугольной формы толщина утеплителя будет ещё больше, т.к. при той же расчетной площади вырастет периметр здания.

Выводы.

1. Проведенные исследования показывают, что с использованием существующих требований к тепловой защите ограждающих конструкций подвала, стены и пол которого контактируют с грунтом, проблематично выполнить расчеты данных ограждений. При расчетах необходимая толщина теплоизоляции значительно превышает фактически необходимую, что значительно повышает стоимость строительства зданий.

2. Требуется уточнения формула (Г.15) из СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий», используемая для определения приведенного сопротивления теплопередаче полов по грунту, в части учета или неучета площади эффективной полосы в расчете.

3. Из-за неточностей в расчетах по определению приведенного сопротивления теплопередаче полов по грунту и стен в грунте при определении теплопотерь через наружные ограждения отапливаемых подвалов фактические значения теплопотерь будут значительно меньше проектных. В результате в системах отопления подвалов будут завышены диаметры труб и размеры отопительных приборов.

4. Необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований и расчетов температурных полей для определения удельных потерь теплоты через теплотехнические неоднородности, характерные для ограждающих конструкций, контактирующих с грунтом. По итогам этих исследований требуется корректировка СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей», а именно переработка и расширение таблиц Г.160 и Г.161 в части учёта толщины утеплителя при определении потерь теплоты через узлы ограждающих конструкций, контактирующих с грунтом.

Список литературы

1. Самарин, О.Д. Совершенствование расчетных зависимостей для температуры воздуха в помещении при интегральном регулировании климатических систем / О.Д. Самарин // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 10. – С. 1389–1395.
2. Береговой, А.М. Обогрев подземных и заглубленных помещений теплом верхнего слоя земли / А.М. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3(60). – С. 184–188.
3. Саргсян, С.В. Учет влияния неоднородностей в стеновой панели на величину сопротивления теплопередаче / С.В. Саргсян, В.В. Агафонова // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 4. – С. 631–644.
4. Иванова, Ю.В. Методы повышения тепловой защиты стеновых конструкций зданий / Ю.В. Иванова, И.В. Федорова, С.Ю. Кадокова // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6(102). – С. 514–525.
5. Корниенко, С.В. Теплотехнические особенности пола по грунту в зеленых зданиях / С.В. Корниенко, Е.М. Брехов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2023. – № 2(91). – С. 38–47.
6. Крайнов, Д.В. К вопросу определения теплопотерь через стену в грунте / Д.В. Крайнов, И.А. Масленников // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 4(62). – С. 96–107.
7. Малявина, Е.Г. Расчетное сопротивление теплопередаче полов по грунту при современных способах теплозащиты / Е.Г. Малявина, Е.А. Гнездилова, Ю.Н. Левина // Строительные материалы. – 2019. – № 6. – С. 44–48.
8. Корниенко, С.В. Зеленые здания. Теплотехнические преимущества пола по грунту / С.В. Корниенко // Энергосбережение. – 2023. – № 3. – С. 24–29.
9. Малявина, Е.Г. Расчет теплопотерь через полы по грунту в зданиях с современной теплозащитой / Е.Г. Малявина, Е.А. Гнездилова, Ю.Н. Левина // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2019. – № 6(1018). – С. 60–62.

References

1. Samarin, O.D. Improvement of calculation dependencies for indoor air temperature with integrated regulation of climate systems / O.D. Samarin // *Bulletin of MGSU*. – 2022. – Vol. 17, №10. – P. 1389–1395.
2. Beregovoy, A.M. Heating of underground and recessed spaces with heat from the upper layer of the earth / A.M. Beregovoy // *Regional architecture and engineering*. – 2024. – №3 (60). – P. 184–188.
3. Sargsyan, S.V. Accounting for the influence of inhomogeneities in a wall panel on the value of heat transfer resistance / S.V. Sargsyan, V.V. Agafonova // *Bulletin of MGSU*. – 2024. – Vol. 19, №4. – P. 631–644.
4. Ivanova, Yu.V. Methods for increasing thermal protection of building wall structures / Yu.V. Ivanova, I.V. Fedorova, S.Yu. Kadokova // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2023. – №6 (102). – P. 514–525.
5. Kornienko, S.V. Thermal engineering features of the floor on the ground in green buildings / S.V. Kornienko, E.M. Brekhov // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. – 2023. – №2 (91). – P. 38–47.
6. Kraynov, D.V. On the issue of determining heat loss through a wall in the ground / D.V. Kraynov, I.A. Maslennikov // *Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2022. – №4 (62). – P. 96–107.
7. Malyavina, E.G. Calculated heat transfer resistance of floors on the ground with modern thermal protection methods / E.G. Malyavina, E.A. Gnezdilova, Yu.N. Levina // *Construction materials*. – 2019. – №6. – P. 44–48.
8. Kornienko, S.V. Green buildings. Thermal engineering advantages of floors on the ground / S.V. Kornienko // *Energy saving*. – 2023. – №3. – P. 24–29.
9. Malyavina, E.G. Calculation of heat losses through floors on the ground in buildings with modern thermal protection / E.G. Malyavina, E.A. Gnezdilova, Yu.N. Levina // *BST: Bulletin of construction equipment*. – 2019. – №6 (1018). – P. 60–62.

УДК 620.92 + 628.11

DOI 10.54734/20722958_2025_3_172

Тюменский индустриальный университет
Россия, 625000, г. Тюмень,
ул. Володарского, 38

Миронов Виктор Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Инженерные
системы и сооружения»
E-mail: vvmironov@list.ru

Ерофеев Евгений Александрович,
старший преподаватель кафедры
«Инженерные системы и сооружения»
E-mail: e.a.erofeev@mail.ru

Иванюшин Юрий Андреевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Инженерные системы
и сооружения»
E-mail: ivanjushinja@tyuiu.ru

Степанов Олег Андреевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Промышленная
теплоэнергетика»
E-mail: stepanovoa@tyuiu.ru

ООО «ЭЛЕКТРОРАМ»

Россия, 625023, г. Тюмень,
ул. Пржевальского, 33, к. 1, кв. 79

Миронов Дмитрий Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий инженер
E-mail: dvmironov@yandex.ru

Industrial University of Tyumen (IUT)
Russia, 625000, Tyumen, 38,
Volodarskogo St.

Mironov Viktor Vladimirovich,
Doctor of Sciences, Professor, Professor of the
Department «Engineering Systems and
Structures»
E-mail: vvmironov@list.ru

Erofeev Evgeniy Aleksandrovich,
Senior Lecturer at the Department
«Engineering Systems and Structures»
E-mail: e.a.erofeev@mail.ru

Ivanyushin Yuriy Andreevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Engineering Systems and
Structures»
E-mail: ivanjushinja@tyuiu.ru

Stepanov Oleg Andreevich,
Doctor of Sciences, Professor,
Professor of the Department «Industrial Heat
Power Engineering»
E-mail: stepanovoa@tyuiu.ru

LLC «ELECTRO RAM»

Russia, 625023, Tyumen, Przheval'skogo, 33,
corp. 1, ap. 79

Mironov Dmitriy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Lead Engineer
E-mail: dvmironov@yandex.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ И ЛЬДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВОЛН

В.В. Миронов, Е.А. Ерофеев, Ю.А. Иванюшин, Д.В. Миронов, О.А. Степанов

Приведено описание принципиальной схемы работы генератора пневматической мощности, основанной на использовании энергии морских волн. Представлены расчетные зависимости получения пневматической мощности, используемой для получения горячей воды и льда. Рассмотрена производительность горячей воды и льда в зависимости от высоты морских волн.

Ключевые слова: волновая энергетика, пневматическая энергия, сильфонный компрессор, получение горячей воды, получение льда

TECHNOLOGY FOR PRODUCING HOT WATER AND ICE USING THE ENERGY OF SEA WAVES

V.V. Mironov, E.A. Erofeev, Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov, O.A. Stepanov

The description of the schematic diagram of the pneumatic power generator, operation based on the use of the energy of sea waves is given. The calculated dependences of obtaining the pneumatic power used to produce hot water and ice are presented. The production of hot water and ice is presented depending on the height of the sea waves.

Keywords: wave energy, pneumatic energy, bellows compressor, hot water production, ice production

Введение

В связи с ограничениями регулярного авиасообщения со многими странами, предоставляющими услуги оздоровительного отдыха и туризма, сложностями в их оплате появился повышенный спрос на соответствующие услуги на внутреннем рынке [1]. Исследование АНО «Национальные приоритеты» показало, что у россиян растет желание путешествовать по стране, в том числе в рамках коротких поездок¹. Популярность набирают экологический туризм, а также пешие прогулки, отдых на морском берегу. Однако современные люди, проживающие в городах, привыкли к комфорту и привычным удобствам (горячая вода, холодильники и кондиционирование воздуха) [2, 3].

Пляжные модульные гостиницы (глэмпинги) из-за удаленности от населенных территорий имеют сложности с подключением к централизованным системам жизнеобеспечения. Использование автономных дизельных генераторов энергии для жизнеобеспечения гостиниц экономически нецелесообразно ввиду высокой стоимости получаемой энергии [4, 5], а также постоянного шума как вредного фактора. В работе [6] отмечено, что российский рынок глэмпинг-туризма развивается в направлении повышения экологичности. Авторы предлагают использовать возобновляемую энергию морских волн высокой обеспеченности и повторяемости [7] для автономного жизнеобеспечения отелей, в частности для получения горячей воды и льда как источника холода.

В условиях противоречия между ростом глобального спроса на энергию и обещаниями стран по сокращению выбросов углерода среди различных ВИЭ энергия волн обладает наибольшим потенциалом для его преодоления, поскольку является относительно неисследованным ресурсом². Волновая энергетика – практически неисчерпаемый источник энергии.

Технологии получения горячей воды и льда

Цель исследования – разработка инновационной технологии получения горячей воды и льда на основе возобновляемой энергии морских волн.

Глобально энергия океанских волн обладает высоким потенциалом. По различным оценкам, он может достигать 32 тыс. ТВт·ч/год (до 16 тыс. ТВт·ч/год с учетом направления волн) [8, 9]. Суммарная протяженность мировой береговой линии составляет около 800 тыс. км. При этом в 2 % этой протяженности плотность волнового течения составляет более 30 кВт/м, что дает предполагаемый глобальный технический потенциал волнового течения около 500 ГВт электроэнергии (с эффективностью преобразования 40 %).

Эффективные с точки зрения технико-экономических параметров места размещения объектов преобразования волновой энергии можно найти по всему миру [8, 9]. В то же время фактические волновые режимы значительно различаются в разных регионах мира [8, 10]. Технические решения, разработанные коллективом авторов (Тюменский индустриальный университет, ООО «ЭЛЕКТРОРАМ»), позволяют снимать энергию морских волн и преобразовывать ее в пневматическую мощность. Из полученной пневматической мощности с использованием известных технологий можно генерировать тепло, холод или электрическую энергию для жизнеобеспечения пляжных модульных гостиниц. Одно из разработанных технических решений представляет собой сильфонный насос-компрессор (патент на изобретение РФ № 2817577) [11], приводимый в работу бум с положительной плавучестью, способным подстраиваться под изменяющийся уровень морской акватории под действием приливно-отливных или нагонных ветровых явлений. Схема насоса-компрессора представлена на рис. 1.

¹ Тенденции туризма в России: точки притяжения, недооцененные локации и регионы «невидимки». URL: <https://clck.ru/3FnxEV>

² Global Renewable Outlook: Energy transformation 2050. URL: <https://clck.ru/3Fnx3r>

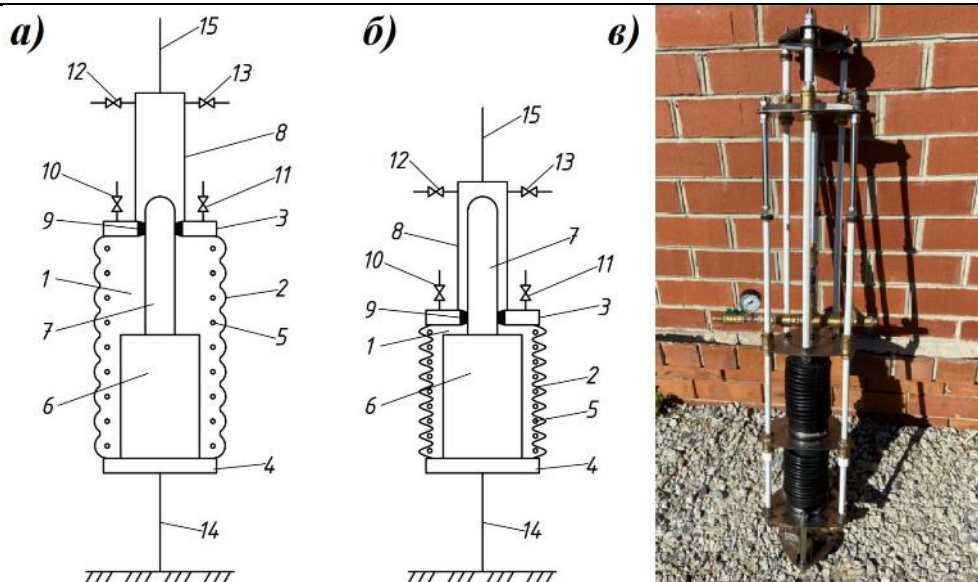


Рис. 1. Схема сифонного насоса-компрессора:

а – положение на гребне волны; б – положение во впадине волны;

в – общий вид прототипа сифонного насоса-компрессора;

- 1 – рабочая камера; 2 – сифонные элементы из эластичного теплоизоляционного материала с низкой теплопроводностью; 3 – подвижная стенка рабочей камеры; 4 – неподвижное днище рабочей камеры; 5 – кольца жесткости; 6 – твердый или жидкий цилиндр, являющийся поршнем воздушного компрессора и уменьшающий образование мертвого объема в рабочей камере компрессора; 7 – плунжер водяного насоса; 8 – корпус водяного насоса; 9 – уплотнение плунжера водяного насоса; 10 – всасывающий клапан воздушного компрессора; 11 – нагнетательный клапан воздушного компрессора; 12 – всасывающий клапан водяного насоса; 13 – нагнетательный клапан водяного насоса; 14 – трос, соединяющий неподвижное днище рабочей камеры с дном акватории моря; 15 – трос, соединяющий корпус водяного насоса с плавучим бумом, снимающим энергию морских волн

Подробное описание работы изобретения представлено в [11, 12]. Согласно изобретению, техническое решение позволяет использовать возобновляемую энергию морских волн для одновременной генерации гидравлической и пневматической энергии, в результате предотвращается загрязнение окружающей среды парниковыми газами. Полученную гидравлическую энергию морской воды с высоким давлением можно использовать в обратноосмотических установках для опреснения морской воды. Полученную пневматическую энергию можно преобразовывать в тепловую и энергию холода в теплообменниках и детандерных установках.

Привод насоса-компрессора от энергии морских волн осуществляется согласно другому техническому решению (патент на изобретение РФ № 2813520). Подробное описание работы изобретения представлено в описании патента на изобретение [13]. Общий вид устройства показан на рис. 2.

При волнении поверхности акватории буй (1) совершает возвратно-поступательные движения вверх и вниз. При движении буя (1) вверх происходит перемещение вверх намотанных на барабан (4) тросов (2) на высоту морской волны. За счет блока (5), жестко связанного с донным фиксатором (6), вертикальное перемещение рабочего органа насоса-компрессора (3) будет в два раза больше высоты морской волны, что обеспечит увеличение производительности насоса-компрессора.

Представленные в данной работе технические решения предлагаются к внедрению в схему преобразования энергии морских волн [14] в полезную мощность (тепловую, холода и электрическую) для автономного жизнеобеспечения зданий и сооружений.

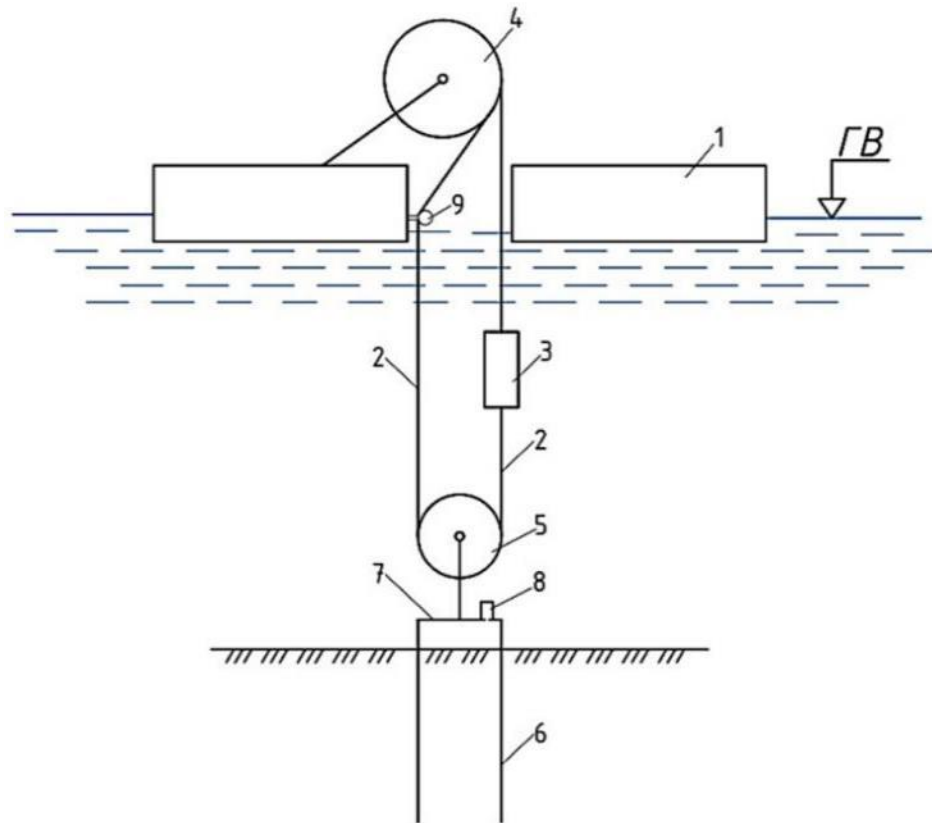


Рис. 2. Съемник энергии морских волн:

1 – буй с положительной плавучестью; 2 – тросы; 3 – насос-компрессор с возвратно-поступательным движением рабочего органа; 4 – барабан, снабженный храповым механизмом и спиральной ленточной пружиной; 5 – блок; 6 – вертикальная труба, заглушенная сверху; 7 – заглушка; 8 – патрубок с обратным клапаном; 9 – направляющий ролик

Расчетные зависимости

Рассмотрим работу энергетической станции, состоящей из плавучих модулей, работающей на энергии морских волн высокой обеспеченности и повторяемости, на примере одного плавучего модуля. Генератор пневматической энергии (сильфонный насос-компрессор) погружен на глубину H ниже поверхности морской акватории. Тогда избыточное давление на глубине p , Па [15]:

$$p = \rho \cdot g \cdot H, \quad (1)$$

где ρ – плотность морской воды, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Сила гидростатического давления F , Н, на верхнюю стенку воздушной камеры сильфонного компрессора:

$$F = p \cdot \omega = p \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \quad (2)$$

где ω – площадь сечения круглой верхней стенки рабочей камеры, м^2 ; D – диаметр круглой верхней стенки рабочей камеры, м.

Погружение буя под уровень моря, компенсирующее его вес h_1 , м:

$$h_1 = \frac{G}{\rho \cdot g \cdot \omega_1}, \quad (3)$$

где G – вес буя, Н; ω_1 – площадь поверхности буя, м^2 .

Выталкивающая сила F_1 , действующая на буй, при его погружении под уровень акватории, Н:

$$F_1 = \rho \cdot g \cdot \omega_1 \cdot h_b, \quad (4)$$

где h_b – заданное рабочее погружение буя, м.

При работе полиспаста выталкивающая сила, действующая на буй, должна быть в два раза больше силы гидростатического давления на верхнюю стенку воздушной камеры сифонного компрессора.

Полная высота буя h_p , м:

$$h_p = h_1 + h_b + h_3, \quad (5)$$

где h_3 – высота запаса, не менее 0,05 м.

Максимальная выталкивающая сила F_2 , на величину которой должно рассчитываться крепление к донной поверхности акватории (вакуумный анкер), Н:

$$F_2 = \rho \cdot g \cdot \omega_1 \cdot h_p. \quad (6)$$

Ход рабочего органа сифонного компрессора при установке его на плавучий модуль с полиспастом h_n , зависящий от высоты волны h , м:

$$h_n = 2 \cdot (h - h_b). \quad (7)$$

Массовая производительность сифонного компрессора по воздуху m , кг/ч, исходя из уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$m = \frac{\frac{p_a}{R \cdot T1} \cdot \left[\frac{\pi \cdot D^2}{2} \cdot (h - h_b) \right] \cdot 3600}{t}, \quad (8)$$

где p_a – атмосферное давление, Па; R – газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·К); $T1$ – абсолютная температура наружного воздуха, К; t – период морской волны, с.

Мощность адиабатного (идеального) сжатия воздуха в сифонном компрессоре N_c , Вт [16]:

$$N_c = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T1 \cdot \left[\left(\frac{p + p_a}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \cdot \frac{m}{3600}, \quad (9)$$

где $k = 1,4$ – показатель адиабаты.

Абсолютная температура воздуха $T2$ после адиабатного сжатия в сифонном компрессоре, К [16]:

$$T2 = T1 \cdot \left(\frac{p + 10^5}{10^5} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}. \quad (10)$$

Теоретическая массовая производительность по горячей воде m_v , кг/ч, в теплообменнике после сифонного компрессора при нагреве воды до $T_k = 60^\circ\text{C}$, кг/ч:

$$m_v = \frac{c_p \cdot m \cdot (T2 - T1)}{c_v \cdot [(273 + T_k) - T1]}, \quad (11)$$

где c_p – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); c_v – теплоемкость воды, Дж/(кг·К).

Мощность адиабатного расширения воздуха в детандере, охлажденного в теплообменнике водой до температуры $T1$:

$$N_p = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_a}{p + p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot \frac{m}{3600}. \quad (12)$$

Абсолютная температура воздуха после расширения в детандере $T3$:

$$T3 = T1 \cdot \left(\frac{p_a}{p + p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (13)$$

Массовая производительность детандера m_l , кг/ч, по льду при охлаждении льда до $T_l = 270$ К (что соответствует -3°C):

$$m_l = \frac{c_p \cdot m \cdot (T1 - T3)}{q + c_v \cdot (T1 - T0) + c_l \cdot (T0 - T_l)}, \quad (14)$$

где c_l – теплоемкость льда, Дж/(кг·К); q – скрытая теплота плавления льда, Дж/кг; $T0 = 273$ К – температура смены агрегатного состояния (перехода воды из жидкого в твердое состояние).

Результаты

По приведенным выше аналитическим зависимостям был выполнен гипотетический расчет преобразования энергии морских волн в диапазоне изменения их высоты от 0,2 до 1,0 метра в теоретическую полезную мощность для получения горячей воды и льда как источника холода.

Сильфонный компрессор помещен на глубину 30 метров под поверхность акватории моря. Период морской волны принят равным 4 секундам. Площадь поверхности плавучего бую – 16 м². Высота плавучего бую – 0,2 м. Диаметр поршня сильфонного компрессора – 0,25 м. Графическая интерпретация данных, полученных по результатам расчета гипотетического примера на основе представленных зависимостей, приведена на рис. 3 и 4.

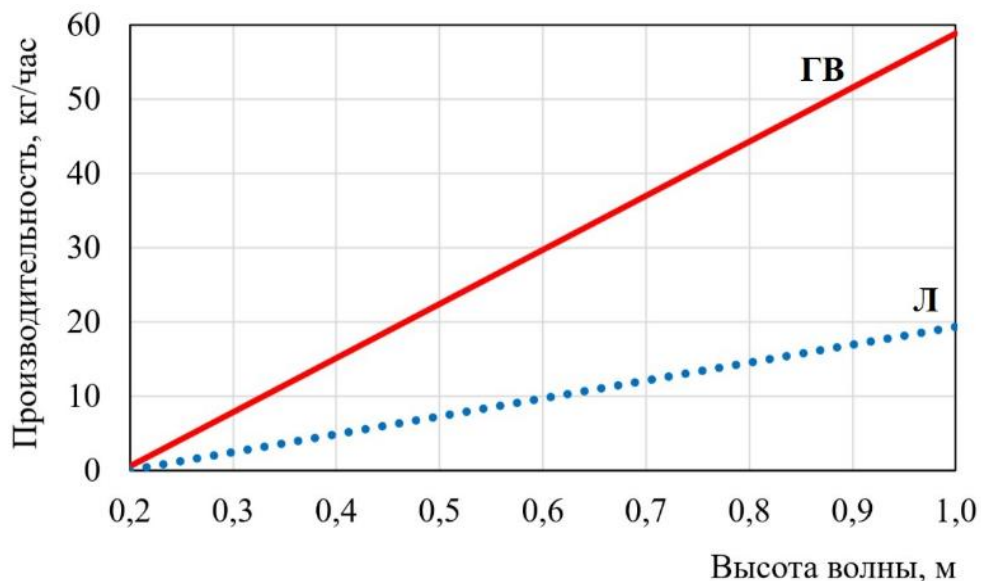


Рис. 3. Производительность по горячей воде и льду в зависимости от высоты волны:
ГВ (красная сплошная линия) – горячая вода; Л (синяя пунктирная линия) – лёд

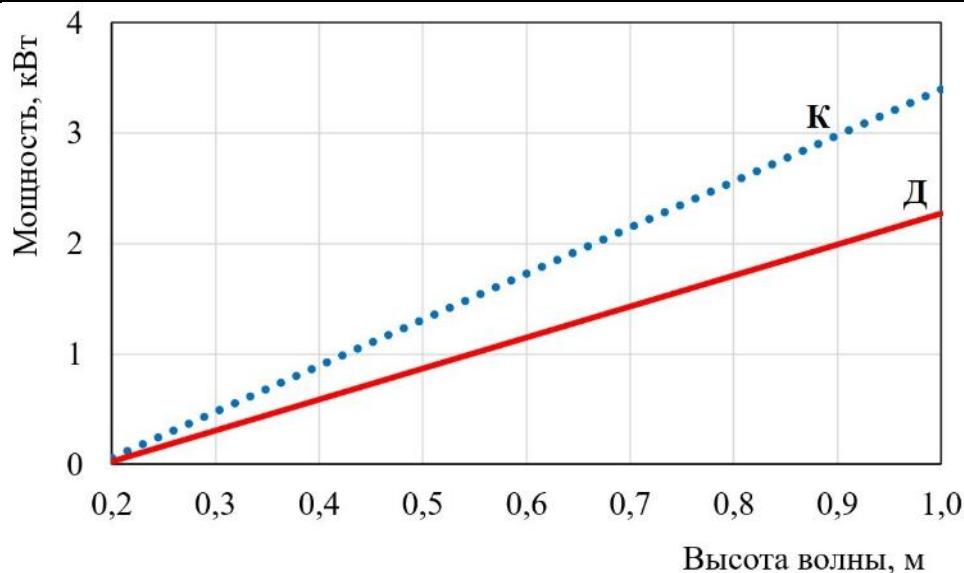


Рис. 4. Теоретическая мощность сжатия воздуха в сильфонном компрессоре и расширения в детандере в зависимости от высоты волны:

К (синяя пунктирная линия) – мощность адиабатного сжатия воздуха; Д (сплошная красная линия) – мощность адиабатного расширения охлажденного воздуха в детандере

Выводы

Проведенные исследования показали, что разработанные технические решения по использованию энергии морских волн высокой обеспеченности и повторяемости, а также выполненный гипотетический расчет производительности модульной энергетической установки по горячей воде и льду как источнику холода могут применяться для автономного жизнеобеспечения объектов некапитального строительства в прибрежной зоне морских акваторий. Снимаемая с вала детандера механическая мощность при использовании электрогенераторов позволит дополнительно к тепловой и энергии холода получать также электрическую энергию.

Список литературы

1. Латышева, А.А. Инновационные подходы к организации услуг санаторно-курортного туризма / А.А. Латышева, С.Л. Мозокина, Л.В. Хорева, А.В. Шраер // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2022. – № 3 (135). – С. 82–88.
2. Петренко, А.С. Формирование и управление инвестиционной политикой туристской отрасли в Ростовской области / А.С. Петренко // Перспективы развития индустрии туризма и гостеприимства: теория и практика: сборник трудов 2-й Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : ФГБОУ ВО РГУПС, 2019. – С. 52–58.
3. Giannoukou, I. Behavior analysis of glamping as a novel tourism marketing trend / I. Giannoukou, E. Fafouti, C. Halkiopoulos. – DOI 10.1007/978-3-031-29426-6_34 // Springer proceedings in business and economics. – 2023. – P. 537–562.
4. Nsafon, B.E.K. Optimization and sustainability analysis of PV/wind/diesel hybrid energy system for decentralized energy generation / B.E.K. Nsafon, A.B. Owolabi, H.M. Butu, J.W. Roh, D. Suh, J. Huh. – DOI 10.1016/j.esr.2020.100570 // Energy Strategy Reviews. – 2020. – Vol. 32. – P. 100570.
5. Robertson, B. Renewable integration for remote communities: Comparative allowable cost analyses for hydro, solar and wave energy / B. Robertson, J. Bekker, B. Buckham. – DOI 10.1016/j.apenergy.2020.114677 // Applied Energy. – 2020. – Vol. 264. – P. 114677.
6. Dorofeeva, A.R. Towards green travel: application of principles of ecological tourism in the Russian glamping market / A.R. Dorofeeva. – DOI 10.2478/ejthr-2021-0016 // European journal of tourism, hospitality and recreation. – 2021. – Vol. 11 (2). – P. 171–180.

7. Залиханов, А.М. Парусные энергетические установки морского базирования: география использования / А.М. Залиханов, К.В. Чекарев. – DOI 10.24412/2658-6703-2024-2-61-78 // *Окружающая среда и энерговедение*. – 2024. – № 2. – С. 61–78.
8. Satymov, R. Techno-economic assessment of global and regional wave energy resource potentials and profiles in hourly resolution / R. Satymov, D. Bogdanov, M. Dashedi, G. Lavidas, C. Breyer. – DOI 10.1016/j.apenergy.2024.123119 // *Applied Energy*. – 2024. – Vol. 364. – P. 123119.
9. Guo, B. A review of wave energy technology from a research and commercial perspective / B. Guo, J.V. Ringwood. – DOI 10.1049/rpg2.12302 // *IET Renewable Power Generation*. – 2021. – Vol. 15, iss. 14. – P. 3065–3090.
10. Khan, M.Z.A. Harvesting energy from ocean: technologies and perspectives / M.Z.A. Khan, H.A. Khan, M. Aziz. – DOI 10.3390/en15093456 // *Energies*. – 2022. – Vol. 15 (9). – P. 3456.
11. Пат. 2817577 Российская Федерация, МПК F04B 19/06, F03B 13/18. Сильфонный насос-компрессор / В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, Д.В. Миронов, Д.А. Суглобов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет». – №2023118940; заявл. 17.07.2023; опубл. 16.04.2024, Бюл. №11 – 8 с.
12. Миронов, В.В. Получение холода с использованием гидравлической энергии / В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, Д.В. Миронов, А.А. Кадысева, Д.А. Суглобов. – DOI 10.54734/20722958_2024_1_157 // *Региональная архитектура и строительство*. – 2024. – № 1 (58). – С. 157–165.
13. Пат. 2813520 Российская Федерация, МПК C02F 1/44, F03B 13/14. Способ очистки воды от соли и загрязнений / В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, Д.В. Миронов, Д.А. Суглобов; заявитель и патентообладатель ООО «ЭЛЕКТРОРАМ». – №2023113267; заявл. 22.05.2023; опубл. 12.02.2024, Бюл. №5 – 8 с.
14. Миронов, В.В. Технология жизнеобеспечения пляжных глэмпингов с использованием возобновляемой энергии морских волн / В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, Д.А. Суглобов, Д.В. Миронов, Л. И. Максимов. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.4.618-630 // *Вестник МГСУ*. – 2024. – Т. 19, вып. 4. – С. 618–630.
15. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика / Д.В. Штеренлихт. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
16. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В.М. Черкасский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.

References

1. Latysheva, A.A. Innovative approaches to the organization of sanatorium-resort tourism services / A.A. Latysheva, S.L. Mozokina, L.V. Khoreva, A.V. Shraer // *Izvestiya St. Petersburg State University of Economics*. – 2022. – №. 3 (135). – P. 82–88.
2. Petrenko, A.S. Formation and management of the investment policy of the tourism industry in the Rostov region // *Prospects for the development of the tourism and hospitality industry: theory and practice: proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference*. – Rostov-on-Don: FGBOU IN RGUPS, 2019. – P. 52–58.
3. Giannoukou, I. Behavior analysis of glamping as a novel tourism marketing trend / I. Giannoukou, E. Fafouti, C. Halkiopoulou. – DOI 10.1007/978-3-031-29426-6_34 // *Springer proceedings in business and economics*. – 2023. – P. 537–562.
4. Nsafon, B.E.K. Optimization and sustainability analysis of PV/wind/diesel hybrid energy system for decentralized energy generation / B.E.K. Nsafon, A.B. Owolabi, H.M. Butu, J.W. Roh, D. Suh, J. Huh. – DOI 10.1016/j.esr.2020.100570 // *Energy Strategy Reviews*. – 2020. – Vol. 32. – P. 100570.
5. Robertson, B. Renewable integration for remote communities: Comparative allowable cost analyses for hydro, solar and wave energy / B. Robertson, J. Bekker, B. Buckham. – DOI 10.1016/j.apenergy.2020.114677 // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 264. – P. 114677.

6. Dorofeeva, A.R. Towards green travel: application of principles of ecological tourism in the Russian glamping market / A.R. Dorofeeva. – DOI 10.2478/ejthr-2021-0016 // European journal of tourism, hospitality and recreation. – 2021. – Vol. 11 (2). – P. 171–180.
7. Zalikhanov, A.M. Offshore sailing power plants: geography of use / A.M. Zalikhanov, K.V. Chekarev. – DOI 10.24412/2658-6703-2024-2-61-78 // Environment and energy Science. – 2024. – No. 2. – P. 61–78.
8. Satymov, R. Techno-economic assessment of global and regional wave energy resource potentials and profiles in hourly resolution / R. Satymov, D. Bogdanov, M. Dadashi, G. Lavidas, C. Breyer. – DOI 10.1016/j.apenergy.2024.123119 // Applied Energy. – 2024. – Vol. 364. – P. 123119.
9. Guo, B. A review of wave energy technology from a research and commercial perspective / B. Guo, J.V. Ringwood. – DOI 10.1049/rpg2.12302 // IET Renewable Power Generation. – 2021. – Vol. 15, iss. 14. – P. 3065–3090.
10. Khan, M.Z.A. Harvesting energy from ocean: technologies and perspectives / M.Z.A. Khan, H.A. Khan, M. Aziz. – DOI 10.3390/en15093456 // Energies. – 2022. – Vol. 15 (9). – P. 3456.
11. Pat. 2817577 Russian Federation, MPC F04B 19/06, F03B 13/18. Bellows compressor pump / V.V. Mironov, Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov, D.A. Suglovov; applicant and patent holder of the Industrial University of Tyumen. – No. 2023118940; application 17/07/2023; publ. 16/04/2024, Bull. No. 11. – 8 p.
12. Mironov, V.V. Getting cold using hydraulic energy / V.V. Mironov, Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov, A.A. Kadyseva, D.A. Suglovov. – DOI 10.54734/20722958_2024_1_157 // Regional architecture and engineering. – 2024. – № 1 (58). – P. 157–165.
13. Pat. 2813520 Russian Federation, MPC C02F 1/44, F03B 13/14. Method of water purification from salt and impurities / V.V. Mironov, Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov, D.A. Suglovov; applicant and patent holder of the LLC «ELECTRORAM». – No. 2023113267; application 05/22/2023; publ. 02/12/2024, Bull. No. 14. – 8 p.
14. Mironov, V.V. Life support technology of beach glamping using renewable energy of sea waves / V.V. Mironov, Yu.A. Ivanyushin, D.A. Suglovov, D.V. Mironov, L.I. Maksimov. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.4.618-630 // Vestnik MGSU. – 2024. – Vol. 19, iss. 4. – P. 618–630.
15. Shterenlicht, D.V. Hydraulics / D.V. Shterenlicht. – Moscow : Energoatomizdat, 1984. – 640 p.
16. Cherkassky, V.M. Pumps, fans, compressors / V.M. Cherkassky. – 2nd ed., reprint. and additional. – Moscow : Energoatomizdat, 1984. – 416 p.

УДК 621.6.036

DOI 10.54734/20722958_2025_3_181

*АО «Гипрониигаз»*Россия, 410012, г. Саратов, проспект
им. Петра Столыпина, д.54**Хомутов Антон Олегович,**кандидат технических наук, заместитель
генерального директора по научному
развитию

E-mail: khomutov.anton@gmail.com

*Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.*Россия, 410054, г. Саратов,
Политехническая, д. 77**Усачев Александр Прокофьевич,**доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогазоснабжение
и нефтегазовое дело»

E-mail: usachev-ap@mail.ru

Рулев Александр Владимирович,доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогазоснабжение
и нефтегазовое дело»

E-mail: nautech@inbox.ru

*JSC Giproniigas*Russia, 410012, Saratov, 54, prospect named
after him. Peter Stolypin**Khomutov Anton Olegovich,**Candidate of Sciences, Deputy Director
General for Scientific Development
E-mail: khomutov.anton@gmail.com*Yuri Gagarin State Technical University of
Saratov*

Russia, 410054, Saratov, 77, Polytechnic St.

Usachev Aleksander Prokofievich,Doctor of Sciences, Professor of the
Departments «Heat and Gas Supply and Oil
and Gas Engineering»

E-mail: usachev-ap@mail.ru

Rulev Aleksandr Vladimirovich,Doctor of Sciences, Professor of the
Departments «Heat and Gas Supply and Oil
and Gas Engineering»

E-mail: nautech@inbox.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО УСТРАНЕНИЮ ОТЛОЖЕНИЙ МЕХПРИМЕСЕЙ МЕЖДУ ФИЛЬТРУЮЩИМИ КАРТРИДЖАМИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ

А.О. Хомутов, А.П. Усачев, А.В. Рулев

Описывается метод и предлагается математическая модель по устранению отложений мехпримесей в зазоре между фильтрующими картриджами предварительной и тонкой очистки, в котором увеличиваются размеры ячеек первых по ходу потока газа слоев фильтрующих полотен тонкой очистки выше максимального диаметра мехпримесей.

Ключевые слова: метод, устранение отложений, мехпримеси, фильтрующие картриджи, математическая модель, потери давления

DEVELOPMENT OF A METHOD AND MATHEMATICAL MODEL FOR ELIMINATION OF DEPOSITS OF MECHANICAL IMPURITIES BETWEEN PRELIMINARY AND FINE FILTER CARTRIDGES

А.О. Khomutov, А.П. Usachev, А.В. Rulev

The article describes a method and proposes a mathematical model for the elimination of mechanical impurities deposits in the gap between the pre- and fine filter cartridges, in which the cell sizes of the first layers of fine filter cloths in the course of the gas flow increase above the maximum diameter of the mechanical impurities

Keywords: method, removal of deposits, fur impurities, filter cartridges, mathematical model, pressure loss

1. Разработка метода по устранению отложений мехпримесей между фильтрующими картриджами предварительной и тонкой очистки цилиндрической формы

Бесперебойная работа газового регулирующего оборудования с высокой точностью регулирования, в соответствии с требованиями ГОСТ 34011-2016, обеспечивается путем использования фильтров двухступенчатой очистки газа от мехпримесей. Целесообразность применения двухступенчатой очистки от мехпримесей в таких устройствах обоснована в работах [1-5].

Цилиндрические фильтрующие картриджи (ЦФК) в существующих двухступенчатых цилиндрических фильтрах (ДЦФ) предварительной и тонкой очистки газа располагаются в отдельных корпусах, работают при высоких давлениях. Вследствие этого они имеют большие толщины стенок обечаек, днищ и фланцев и значительную металло- и капиталоемкость [2, 6]. Предложен метод установки [7] внутри одного корпуса 1 картриджей предварительной очистки 7 и тонкой очистки 8. Размещение картриджей выполнено на минимально допустимом расстоянии друг от друга, как это изображено на рис. 1. Недостаток таких ЦДФ заключается в отложении мелких твердых примесей в нижней части зазора 12 между ФЦЭ предварительной и тонкой очистки. Твердые частицы, с размером больше ячеек первых слоев фильтрующего полотна, соприкасаясь с его поверхностью, частично откладываются на ней, а частично откладываются в нижней части зазора между ФЦК (7) и ФЦК (8). Механические примеси постепенно создают здесь плотный слой и снижают пропускную способность ЦДФ. С целью предотвращения осаждения механических примесей между фильтрующими цилиндрическими картриджами предварительной и тонкой очистки, многослойное фильтрующее полотно тонкой очистки выполнено в виде ряда расположенных одна за другой сеток. Газовый поток с расходом $V_p = \text{const}$ поступает в сетку картриджа 7 и в ряд сеток картриджа 8, которые последовательно располагаются по направлению газового потока и имеют ячейки квадратной формы и типоразмером ячейки сетки, равным m_n . Интервал сетки n в ряду варьируется как:

$n = (1, 2, \dots, k) \Big|_{b_{n=1+k} > d_{\max}}, \dots, (q, h, \dots, i) \Big|_{b_{n=h+i} < d_{\max}}$. Здесь $b_{n=1+k}$ – размер ячейки первого

ряда сеток тонкой очистки, м; $b_{n=h+i}$ – постоянный размер ячеек второго ряда сеток тонкой очистки, м; $d_{\max}$ – максимальный диаметр механических частиц на выходе из ФЦК предварительной очистки.

Размер ячеек каждой сетки n , как это показано на увеличенном фрагменте А (см. рис. 1), изменяется до значений $m_{n=i} = a_{n=i}, c_{n=i}, e_{n=i}, \dots, j_{n=i}$ в процессе ее засорения.

Накопление твердых частиц в зазоре между ФЦК (7) и ФЦК (8) исключается, если ячейки 10 фильтрующего картриджа предварительной очистки 7 из плетеной металлической сетки будут выполнены размером b_{cr} , равным максимальному диаметру $d_{\max}$ твердых частиц 15, то есть $b_{cr} = d_{\max}$ [8], а полотно для тонкой очистки будет

разделено на два участка. При этом ряд сеток $(1; 2; \dots k) \Big|_{b_{n=1+k} > d_q}$ первого участка будет иметь ячейки с постоянным размером $b_{n=k.m=a_{n=k}}$ и постоянную толщину сеток

$S_{n=k.m=a_{n=k}}$, которая больше, чем максимальный диаметр $d_{\max}$ частиц 15. В этом случае достигается сведение к минимуму осаждение частиц 15 на поверхности ФЦК тонкой очистки 7 за счет их свободного прохода в первый ряд сеток и улавливание внутри полотна.

В целях нахождения размеров $b_{n=k.m=a_{n=k}}$ и $S_{n=k.m=a_{n=k}}$ в АО «Гипронегаз» был изготовлен, а затем испытан ЦДФ внутренним диаметром $D=160$ мм с ФЦК (7) из сетки высокой точности с ячейкой размером 0,08 мм. При этом ФЦК (8) выполнен из сеток высокой точности, согласно ГОСТ 6613-86. В опытах использовалось полотно тонкой

очистки из семи слоев сеток толщиной 1,18 мм на основе сплава «полутомпак» по ГОСТ 6613-86. Размеры ячеек составляют 0,25 мм ($n=1$ и $n=2$); 0,071 мм ($n=3$); 0,063 мм ($n=4$) и 0,056 мм ($n=5$); 0,05 мм ($n=6$); 0,04 мм ($n=7$).

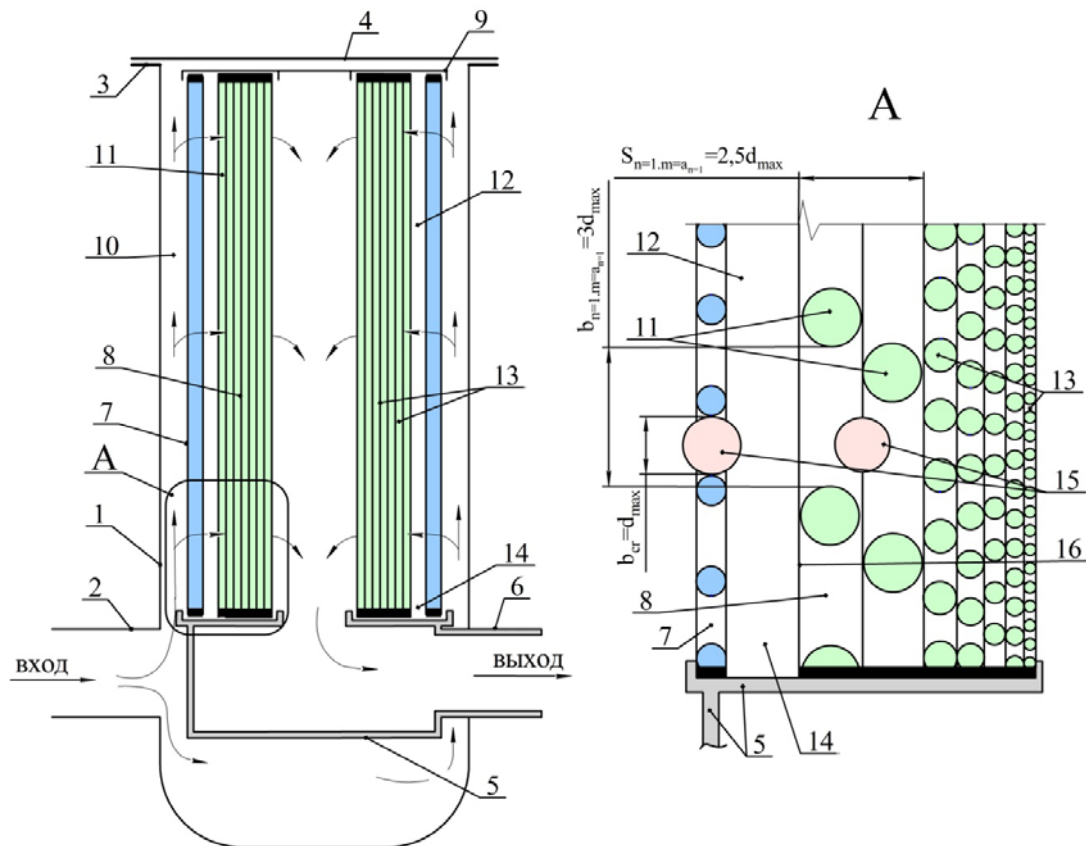


Рис. 1. Схема метода по устранению отложений мехпримесей между цилиндрическими картриджами предварительной и тонкой очистки. Фрагмент А. Размеры первых рядов сеток ЦДФ предварительной и тонкой очистки;

1 – корпус; 2, 6 – патрубки на входе и выходе газа; 3 – фланец; 4 – крышка; 5 – стакан; 7 – ФЦК предварительной очистки; 8 – ФЦК тонкой очистки; 9 – крышка ФЦК 7 и 8; 10 – зазор между ФЦК предварительной очистки и корпусом; 11 – первые фильтрующие слои ФЦК тонкой очистки по ходу газового потока; 12 – зазор между ФЦК предварительной и тонкой очистки; 13 – третий и последующие за ним по ходу газового потока фильтрующие полотна ФЦК тонкой очистки; 14 – нижний сектор зазора 12; 15 – механическая частица с максимальным диаметром, проходящая через ячейки сетки ФЦК предварительной очистки; 16 – граница между первыми по ходу газового потока фильтрующими слоями ФЦК тонкой очистки и зазором 12

Опытная проверка показала, что с внедрением предлагаемого устройства предотвращаются осаждение мехпримесей в зазоре 12 между ФЦК (7) и (8), а также снижение пропускной способности. Также эксперименты показали, что максимальное отложение частиц внутри первых сеток $n=1$ и $n=2$ для ФЦК (8) обеспечивается при размере их ячеек, равном:

$$b_{n=1 \div k, m=j_{n=1 \div k}} = 3d_{\max} \quad (1)$$

Толщина сеток для ФЦК тонкой очистки обеспечивается при

$$S_{n=1 \div k, m=j_{n=1 \div k}} = 2,5d_{\max} \quad (2)$$

Размеры, полученные в результате экспериментов, показаны на рис. 1.

Анализ проведенных экспериментов показал, что разработка метода по устранению отложений мехпримесей в зазоре 12 является актуальной.

2. Разработка уточненной математической модели засорения многослойных фильтрующих полотен, учитывающей устранение отложения мехпримесей в зазоре между ФЦК предварительной и тонкой очистки

Степень засорения ФЦК в любой момент его работы является важным эксплуатационным параметром ЦДФ. Изучение вопросов фильтрации ФЦК отражено в работах [3, 9-14]. В статье [14] в зависимости от потерь давления на ФЦК дана наиболее полная модель по определению степени засорения. Вместе с тем в данной работе не рассматриваются условия по предотвращению накопления твердых частиц в зазоре между ФЦК предварительной и тонкой очистки. Не учитываются имеющие место в предлагаемом способе предотвращения засорения зазора 12 увеличение размеров первых по ходу потока газа слоев 11 до $b_{n=1 \div k, m=j_{n=1 \div k}}$, которые должны быть больше по сравнению с максимальным диаметром твердых частиц $d_{\max}$ (позиция 15 на рис.1), а также значения конкретной толщины $S_{n=1 \div k, m=j_{n=1 \div k}}$ первых слоев 11, которые должны быть больше по сравнению с максимальным диаметром $d_{\max}$ твердых примесей 15. Неучет этих параметров приводит к завышенной степени засорения применительно к предлагаемому способу.

В связи с этим разработка модели аналитического определения степени засорения в зависимости от потерь давления на ФЦК, учитывающей условия, устраняющие отложение мехпримесей в зазоре между ФЦК (7) и (8), является актуальной.

Предлагаемая постановка задачи.

Номер сетки n в ряду определяется как: $n = (1, 2, \dots, k) \Big|_{b_{n=1 \div k} = 3d_{\max}}, \dots, (q, h, \dots, i) \Big|_{b_{n=h \div i} < d_{\max}}$. Вначале твердые частицы диаметром $d_{\max}$ поступают в первые ряды сеток ЦФК с размерами ячеек $b_{n=1 \div k, m=j_{n=1 \div k}} = \text{const}$, после этого – в сетки с размерами ячейки $b_{n=q \div i, m=j_{n=q \div i}} < d_{\max}$. Здесь они осаждаются на их поверхностях по ходу течения газа, и так происходит до самой первой сетки с размерами $b_{n=i, m=j_{n=i}}$. При фильтрации на любой последующей сетке оседают более мелкие частицы. Из рис. 2 и 3 видно, что каждая следующая сетка n по ходу газового потока, по сравнению с предыдущей сеткой, имеет меньший начальный размер.

Снижение каждого предыдущего размера ячейки $b_{n=k, m=(j-1)_{n=k}}$ в первых рядах сеток $n = (1; 2; \dots; \kappa) \Big|_{b_{n=1 \div k} = 3d_{\max}}$ до последующего размера $b_{n=k, m=j_{n=k}}$ (см. рис. 2) при их засорении представляется как увеличение расстояния между ячейками сетки до следующего значения:

$$L_{n=k, m=j_{n=k}} = \left[L_{n=k, m=a_{n=k}} + \sum_{m=a_{n=k}}^{m=j_{n=k}} (b_{n=k, m=(j-1)_{n=k}} - b_{n=k, m=j_{n=k}}) \right] \Big|_{b_{n=k, m=j_{n=k}} (\text{const}) = 3d_{\max}} \quad (3)$$

Здесь предыдущий и последующий размеры квадратной ячейки фильтрующей сетки (в метрах) при прохождении газа через первые ряды сеток $n = (1; 2; \dots; \kappa) \Big|_{b_{n=1 \div k} = 3d_{\max}}$ в процессе фильтрации мехпримесей обозначены как $b_{n=k, m=(j-1)_{n=k}}$ и $b_{n=k, m=j_{n=k}}$.

Снижение величины предыдущего размера ячейки $b_{n=i, m=(j-1)_{n=i}}$ в случае движения газа через ряд сеток $n = (q, h, \dots, i) \Big|_{b_{n=h \div i} < d_{\max}}$ до последующего $b_{n=i, m=j_{n=i}}$ (рис. 2) при их засорении представляется увеличением расстояния между ячейками до значения

$$L_{n=i, m=j_{n=i}} = L_{n=i, m=a_{n=i}} + \sum_{m=a_{n=i}}^{m=j_{n=i}} (b_{n=i, m=(j-1)_{n=i}} - b_{n=i, m=j_{n=i}}) \Big|_{b_{n=q \div i} < d_{\max}} \quad (4)$$

Здесь размеры ячейки фильтрующей сетки при течении потока газа через ряд сеток обозначены как предыдущий $b_{n=i,m=(j-1)_{n=i}}$ и последующий $b_{n=i,m=j_{n=i}}$.

Величина потерь давления $\Delta Z_{n=1 \div i, m=j_{n=1 \div i}}$ при течении газового потока через ряд сеток n с размерами ячейки $b_{n=i,m=j_{n=i}}$ повышается при их засорении. Так, для сетки $n=i$ увеличение происходит до величин:

$$\left(\Delta Z_{n=1,m=j_{n=1}}; \Delta Z_{n=2,m=j_{n=2}}; \dots; \Delta Z_{n=k,m=j_{n=k}} \right) \Big|_{b_{n=1 \div k, m=j_{n=1 \div k}}} = 3d_{\max}; \dots \quad (5)$$

$$; \dots (\Delta Z_{n=q,m=j_{n=q}}; \Delta Z_{n=h,m=j_{n=h}}; \dots \Delta Z_{n=i,m=j_{n=i}}) \Big|_{b_{n=q \div i, m=j_{n=q \div i}}} < d_{\max}$$

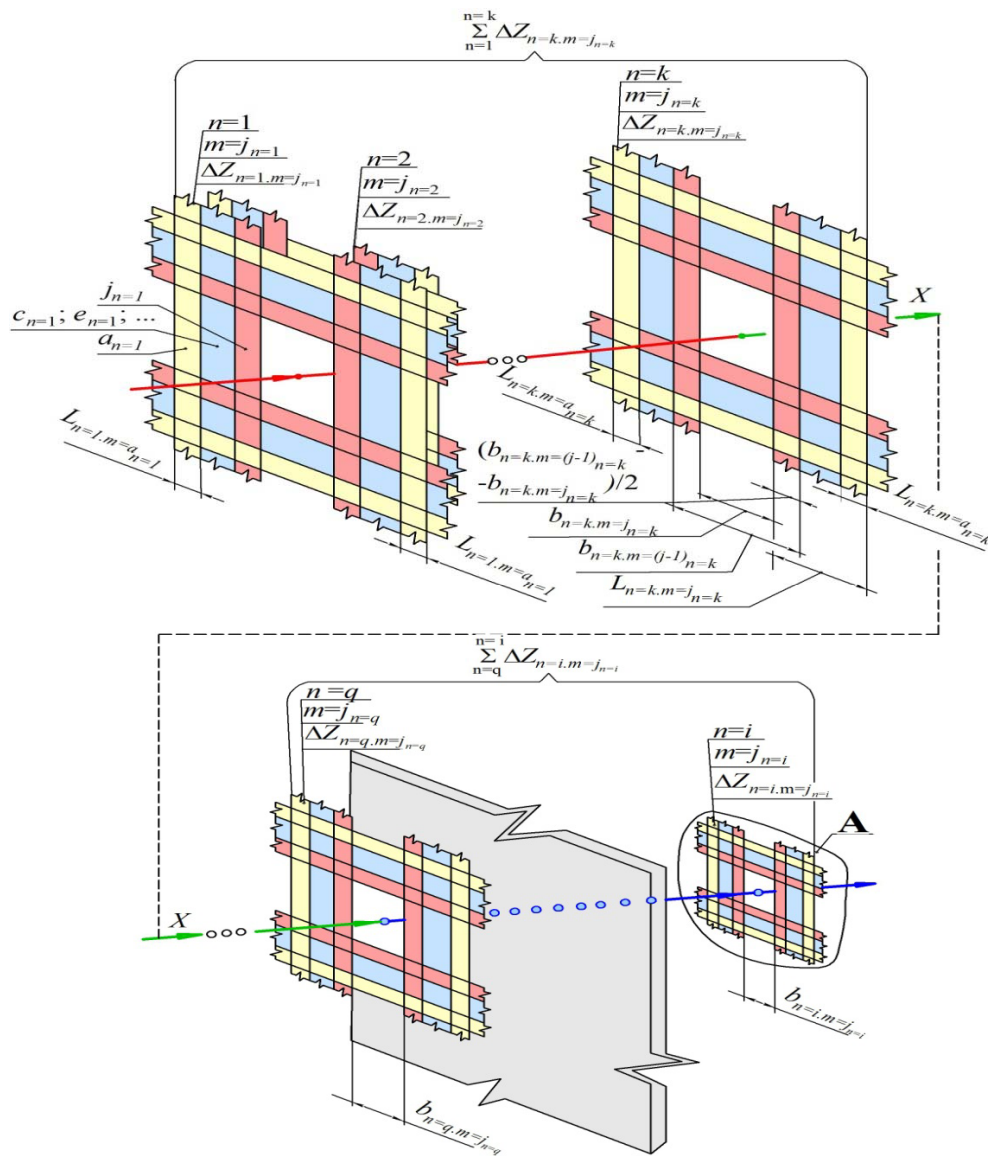


Рис. 2. Схема фрагментов сеток тонкой очистки
с номером $n = (1; 2; \dots k) \Big|_{b_{n=1 \div k} = 3d_{\max}}, \dots, (q, h, \dots, i) \Big|_{b_{n=q \div i} < d_{\max}}$
и типоразмером $m = j_{n=i}, n = (q, h, \dots, i) \Big|_{b_{n=h \div i} < d_{\max}}$

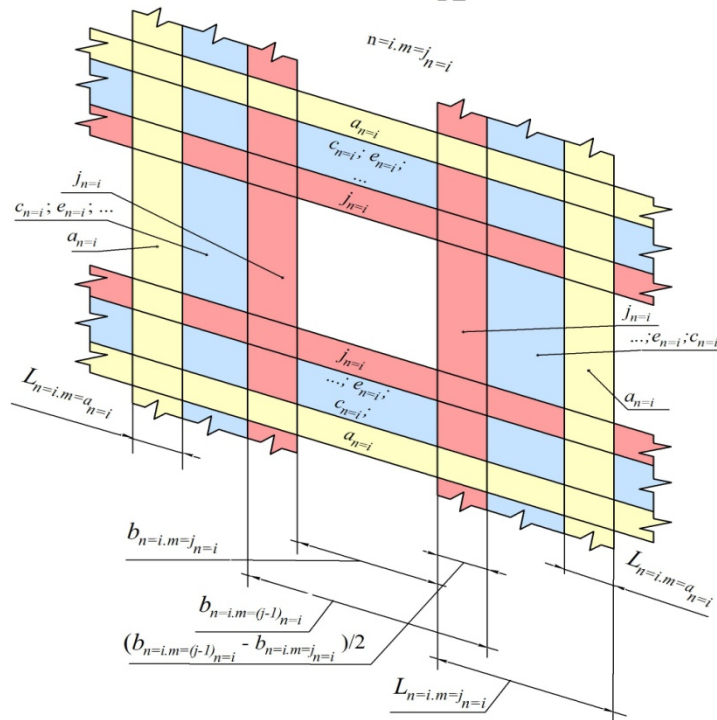


Рис. 3. Фрагмент А для сетки с номером $n = (q, h, \dots, i) \Big|_{b_{n=q:i} < d_{\max}}$

при размере ячейки $b_{n=i, m=j_{n=i}}$

Формула для суммарных потерь давления при течении потока газа через ряд сеток n , установленных друг за другом (см. рис. 2), записывается как:

$$\Delta Z_{n,m} = \sum_{n=1}^{n=k} \Delta Z_{n=k, m=j_{n=k}} \Big|_{b_{n=k, m=j_{n=k}} = 3d_{\max}} + \sum_{n=q}^{n=i} \Delta Z_{n=i, m=j_{n=i}} \Big|_{b_{n=i, m=j_{n=i}} < d_{\max}}. \quad (6)$$

Формула для определения суммарных потерь давления $\Delta Z_{n,m}$ при течении газового потока через ряд сеток n записывается в соответствии с зависимостью Вейсбаха [15] и с учетом формулы (6) следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{n,m} = & \frac{\rho V_p^2}{2g} \times \\ & \times \sum_{n=1}^{n=k} \zeta_{n=k, m=j_{n=k}} \frac{\left[b_{n=1, m=a_{n=1}} + L_{n=1, m=a_{n=1}} + \sum_{m=a_{n=1}}^{m=j_{n=1}} (b_{n=k, m=(j-1)_{n=k}} - b_{n=1, m=j_{n=k}}) \right]^4}{b_{n=k, m=j_{n=k}}^4 F_{n=k, m=j_{n=k}}^2} \Big|_{b_{n=k, m=a_{n=k}} = 3d_{\max}} + \\ & + \frac{\rho V_p^2}{2g} \cdot \sum_{n=q}^{n=i} \zeta_{n=i, m=j_{n=i}} \frac{\left[b_{n=q, m=a_{n=q}} + L_{n=q, m=a_{n=q}} + \sum_{m=a_{n=q}}^{m=j_{n=q}} (b_{n=i, m=(j-1)_{n=i}} - b_{n=i, m=j_{n=i}}) \right]^4}{b_{n=i, m=j_{n=i}}^4 F_{n=i, m=j_{n=i}}^2} \Big|_{b_{n=i, m=a_{n=i}} < d_{\max}}. \quad (7) \end{aligned}$$

Здесь ρ – плотность газа на входе в ФЦК, кг/м³; g – величина ускорения свободного падения, равная 9,8 м/с²; V_p – пропускная способность ФЦК, м³/с; $\zeta_{n=k \div i, m=j_{n=i}}$ и $\zeta_{n=1 \div (k-1), m=j_{n=1}}$ – коэффициенты местного сопротивления сетки по ходу газового потока через ряд сеток $(1, 2, \dots, k) \Big|_{b_{n=1 \div k} = 3d_{\max}}$ и ряд сеток $(q, h, \dots, i) \Big|_{b_{n=q \div i} < d_{\max}}$, характерных для текущих размеров $b_{n=k, m=j_{n=k}}$ и $b_{n=i, m=j_{n=i}}$, обусловленных накоплением мехпримесей [16]; $F_{n=k, m=j_{n=k}}$, $F_{n=i, m=j_{n=i}}$ – общие площади сеток по ходу газового потока через ряд сеток $(1, 2, \dots, k) \Big|_{b_{n=1 \div k} = 3d_{\max}}$ и ряд сеток $(q, h, \dots, i) \Big|_{b_{n=q \div i} < d_{\max}}$.

Значение средней степени засорения фильтрующего полотна (в долях от единицы) находится в соответствии с выражением

$$\theta_{\text{ср.н.м}} = \left\{ \sum_{n=1}^{n=k} \left[\frac{b_{n=1, m=a_{n=1}}^2}{\left(b_{n=1, m=a_{n=1}} + L_{n=1, m=a_{n=1}}\right)^2} - \frac{b_{n=k, m=j_{n=k}}^2}{\left[b_{n=1, m=a_{n=1}} + L_{n=1, m=a_{n=1}} + \sum_{m=a_{n=1}}^{m=j_{n=k}} (b_{n=k, m=(j-1)_{n=k}} - b_{n=k, m=j_{n=k}})\right]^2} \right] \frac{b_{n=1, m=a_{n=1}}^2}{\left(b_{n=1, m=a_{n=1}} + L_{n=1, m=a_{n=1}}\right)^2} \right\} \Big|_{b_{n=k, m=a_{n=k}} = 3d_{\max}} + \left\{ \sum_{n=q}^{n=j} \left[\frac{b_{n=q, m=a_{n=q}}^2}{\left(b_{n=q, m=a_{n=q}} + L_{n=q, m=a_{n=q}}\right)^2} - \frac{b_{n=i, m=j_{n=i}}^2}{\left[b_{n=q, m=a_{n=q}} + L_{n=q, m=a_{n=q}} + \sum_{m=a_{n=q}}^{m=j_{n=i}} (b_{n=i, m=(j-1)_{n=i}} - b_{n=i, m=j_{n=i}})\right]^2} \right] \frac{b_{n=q, m=a_{n=q}}^2}{\left(b_{n=q, m=a_{n=q}} + L_{n=q, m=a_{n=q}}\right)^2} \right\} \Big|_{b_{n=q, m=a_{n=q}} < d_{\max}}. \quad (8)$$

Формулы (7) и (8) также можно применять для расчета потерь давления $\Delta Z_{n, m}$ и степени засорения $\theta_{\text{ср.н.м}}$ одной фильтрующей сетки, если принять величину $n = 1$.

Выводы

1. Разработан метод устранения отложений мехпримесей в зазоре между ФЦК предварительной и тонкой очистки на основе увеличения размеров ячеек и общей толщины первых по ходу газового потока слоев ФЦК тонкой очистки выше значений максимального диаметра механических примесей.

2. Проведенные опыты показали отсутствие отложений мехпримесей в зазоре между ФЦК предварительной и тонкой очистки для предлагаемого варианта, что устраняет загрязнение их ячеек и снижение пропускной способности.

Установлено, что максимальное осаждение механических примесей внутри первых сеток фильтрующего полотна достигается при размере их ячеек и толщине сеток, равных соответственно трем и двум с половиной максимального диаметра твердой частицы.

3. Разработана уточненная математическая модель динамики засорения ФЦК, согласно которой потери давления на первом участке с постоянными размерами ячеек всех сеток и на втором участке с последовательным уменьшением размеров ячеек рассчитываются отдельно друг от друга, поскольку имеют различную зависимость от степени засорения.

4. Проведенные опыты показали одинаковую степень засорения фильтрующих сеток на первом участке с постоянными размерами ячеек всех сеток, где имеет место последовательное уменьшение размеров ячеек. Степень засорения фильтрующих сеток в этом случае и потери давления на первом и втором участках рассчитываются отдельно друг от друга.

Список литературы

1. Павлов, С.И. Повышение стабильности и надежности работы ГРП за счет модернизации оборудования / С.И. Павлов // Газовая промышленность. – 2019. – №. S3. – С. 78–80.
2. Справочник промышленного газового оборудования. – URL: <https://gazovik-gaz.ru/spravochnik.html>. (дата обращения 10.06.2024 г.).
3. Mokhatab, S. Handbook of natural gas transmission and processing: principles and practices / S. Mokhatab, W.A. Poe, J.Y. Mak. – Gulf professional publishing, 2018. – 827 p.
4. Speight, J.G. Natural gas: a basic handbook / J.G. Speight – Gulf Professional Publishing, 2018. – 449 p.
5. Stephens, B. Control of Airborne Particles: Filtration / B. Stephens, A. Maynard, P. K. Hopke // Handbook of Indoor Air Quality. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2022. – P. 1715–1736.
6. Чумаченко, Д. А. Анализ эффективности пылеуловителей для природного газа / Д.А.Чумаченко, И.Н. Колесников // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2017. – №. 1. – С. 25–30.
7. Пат. 174446 Российская Федерация, МПК В01Д 46/24 (2006.01). Устройство для очистки от твердых частиц природного газа высокого давления / Шурайц А.Л., Усачев А.П., Рулев А.В., Салин Д.В., Хомутов А.О., Усуев З.М.; заявитель и патентообладатель АО «Гипрониигаз» – № 2017111708; заявл. 06.04.2017; опубл. 13.10.2017, Бюл. № 29. – 6 с.
8. Пат. 196974 Российская Федерация, МПК В01Д 46/24 (2006.01). Устройство для двухступенчатой очистки от твердых частиц природного газа высокого давления / Усачев А.П., Шурайц А.Л., Рулев А.В., Пикалов А.А., Бирюков А.В.; заявитель и патентообладатель АО «Гипрониигаз» – № 2019132265; заявл. 11.10.2019; опубл. 23.03.2020, Бюл. № 9. – 6 с.
9. Ахмедов, И. Г. Принципы выбора газоочистного оборудования / И. Г. Ахмедов, И. И. Умаров, Ф. А. Дадаханов // Journal of new century innovations. – 2023. – Т. 43, №. 1. – С. 153–165.
10. Каракеян, В. И. Технология очистки газов / В. И. Каракеян, В. Б. Кольцов, О. В. Кондратьева ; под общей редакцией В. И. Каракеяна. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2024. – 184 с.
11. Trevor, S. Filters and Filtration : Handbook / S.Trevor. – 5 edition – Elsevier Butterworth Heinemann, 2016. – 444 p.
12. Hutten, I.M. Handbook of Nonwoven Filter Media / I.M. Hutten. – 2nd Edition. – Butterworth Heinemann, 2016. – 660 p.
13. Thomas, D. Aerosol Filtration / D. Thomas, A. Charvet, N. Bardin-Monnier, J-C Appert-Collin – ISTE Press – Elsevier, 2016. – 218 p.

14. Хомутов, А.О. Моделирование динамики засорения фильтрующих сеток механическими примесями в зависимости от изменения газодинамических потерь на фильтрующем картридже / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Бирюков, А.О. Хомутов // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 3 (36). – С. 148–154.
15. Чугаев, Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости) / Р.Р. Чугаев. – Москва : Бастет, 2013. – 672 с.
16. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – Москва : ЕЭ Медиа, 2024. – 446 с.

References

1. Pavlov, S. I. Increasing the stability and reliability of hydraulic fracturing due to modernization of equipment / S.I. Pavlov // Gas industry. – 2019. – №. S3. – P. 78–80.
2. Handbook of industrial gas equipment. – URL: <https://gazovik-gaz.ru/spravochnik.html>. (accessed 06/10/2024).
3. Mokhatab, S. Handbook of natural gas transmission and processing: principles and practices / S. Mokhatab, W.A. Poe, J. Y. Mak. – Gulf professional publishing, 2018. – 827 p.
4. Speight, J.G. Natural gas: a basic handbook / J.G. Speight – Gulf Professional Publishing, 2018. – 449 p.
5. Stephens, B. Control of Airborne Particles: Filtration / B. Stephens, A. Maynard, P. K. Hopke // Handbook of Indoor Air Quality. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2022. – P. 1715–1736.
6. Chumachenko, D. A. Analysis of the effectiveness of dust collectors for natural gas / D. A. Chumachenko, I. N. Kolesnikov // Urban planning. Infrastructure. Communications. – 2017. – No. 1. – P. 25–30.
7. Pat. 174446 Russian Federation, IPC B01D 46/24 (2006.01). Device for cleaning high-pressure natural gas from solid particles / Shurait A. L., Usachev A. P., Rulev A.V., Salin D. V., Khomutov A. O., Usuev Z. M.; applicant and patent holder of JSC Gipronigaz – No. 2017111708; application 06.04.2017; publ. 13.10.2017, Bul. No. 29. – 6 p.
8. Pat. 196974 Russian Federation, IPC B01D 46/24 (2006.01). Device for two-stage purification from high-pressure natural gas particles / Usachev A.P., Shurait A.L., Rulev A.V., Pikalov A.A., Biryukov A.V.; applicant and patent holder of JSC Gipronigaz – No. 2019132265; application 11.10.2019; publ. 03/23/2020, Issue No. 9. – 6 p.
9. Akhmedov, I. G. Principles of choosing gas cleaning equipment / I. G. Akhmedov, I. I. Umarov, F. A. Dadakhanov // Journal of new century innovations. – 2023. – Vol. 43. – No. 1. – P. 153–165.
10. Karakeyan, V. I. Gas purification technology / V. I. Karakeyan, V. B. Koltsov, O. V. Kondratieva ; under the general editorship of V. I. Karakeyan. — 2nd ed., reprint. and add. – Moscow : Yurait Publishing House, 2024. – 184 p.
11. Trevor, S. Filters and Filtration : Handbook / S.Trevor. – 5 edition – Elsevier Butterworth Heinemann, 2016. – 444 p.
12. Hutten, I.M. Handbook of Nonwoven Filter Media / I.M. Hutten. – 2nd Edition. – Butterworth Heinemann, 2016. – 660 p.
13. Thomas, D. Aerosol Filtration / D. Thomas, A. Charvet, N. Bardin-Monnier, J-C Appert-Collin. – ISTE Press – Elsevier, 2016. – 218 p.
14. Khomutov, A.O. Modeling of the dynamics of clogging of filter grids with mechanical impurities depending on changes in gas dynamic losses on the filter cartridge / A.P. Usachev, A.L. Shurait, A.V. Biryukov, A.O. Khomutov // Regional architecture and Engineering. – 2018. – № 3 (36). – P. 148–154.
15. Chugaev, R.R. Hydraulics (technical mechanics of liquids) / R.R. Chugaev. – Moscow : Bastet, 2013. – 672 p.
16. Idelchik, I.E. Handbook of hydraulic resistances / I.E. Idelchik. – Moscow : HER Media, 2024. – 446 p.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 725:692

DOI 10.54734/20722958_2025_3_190

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

Тамбовский государственный технический университет

Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106,
тел.: (84752) 63-09-20;

Андрианов Константин Анатольевич,
кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Городское строительство и автомобильные
дороги»

E-mail: konst-68@yandex.ru

Леденев Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Городское строительство
и автомобильные дороги»

E-mail: ledvi46@yandex.ru

Матвеева Ирина Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Городское строительство
и автомобильные дороги»

E-mail: times02@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

Grechishkin Aleksander Viktorovich,
Candidate of Sciences, Head of the
department «Urban Development and
Architecture»

E-mail: gsia@pguas.ru

Tambov State Technical University

Russia, 392000, Tambov, 106, Sovetskaya St.,
tel.: (84752) 63-09-20;

Andrianov Konstantin Anatolyevich,
Candidate of Sciences, Head of the
department «Urban development and roads»

E-mail: konst-68@yandex.ru

Ledenev Vladimir Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Urban development and roads»

E-mail: ledvi46@yandex.ru

Matveeva Irina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Urban development and
roads»

E-mail: times02@yandex.ru

АРХИТЕКТУРА И КОНСТРУКЦИИ ЦЕРКВИ ВОСКРЕСЕНИЯ ХРИСТА СПАСИТЕЛЯ В С. КРАСНОЕ ЗНАМЯ ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ

А.В. Гречишкин, К.А. Андрианов., В.И. Леденев, И.В. Матвеева

Дан анализ архитектурных и конструктивных решений уникального памятника храмового зодчества 19 века, расположенного в с. Красное Знамя Тамбовской области. Приведена история его проектирования и строительства. Представлены авторские обмерные чертежи и фотографии памятника в период его обследования. Рассмотрен перечень требуемых работ по сохранению объекта культурного наследия Тамбовской области.

Ключевые слова: объект культурного наследия, церковные сооружения, храмовая архитектура, история усадебного храма

ARCHITECTURE AND STRUCTURES OF THE CHURCH OF THE RESURRECTION OF CHRIST THE SAVIOR IN THE VILLAGE KRASNOE ZNAMYA, TAMBOV REGION

A.V. Grechishkin, K.A. Andrianov, V.I. Ledenev, I.V. Matveeva

The analysis of architectural and constructive solutions of a unique monument of temple architecture of the 19th century, located in the village of Krasnoe Znamya, Tambov region, is given. The history of its design and construction is given. The author's dimensional drawings and photographs of the monument during its survey are presented. The list of required works for the preservation of the cultural heritage site of the Tambov region is considered.

Keywords: cultural heritage site, church buildings, temple architecture, history of the manor church

Общие сведения об объекте культурного наследия. В XIX веке на территории Тамбовской губернии имелось большое количество дворянских усадеб. Их владельцы занимались не только развитием принадлежащего им хозяйства, но и благоустройством усадеб. На их территориях нередко возводились усадебные храмы, предназначавшиеся не только для собственных нужд дворян, но и для обслуживания сельского населения. В XIX веке в губернии было построено более двух десятков подобных храмов. Часть из них сохранилась до настоящего времени на территории Тамбовской области [1]. Сохранившиеся церковные здания в большинстве своем являются недвижимыми памятниками, несущими в себе историческую информацию о людях и событиях, происходивших на территории Тамбовской земли. К таким усадебным храмам относится церковь Воскресения Христа Спасителя в с. Красное Знамя (ранее – Старая Ольшанка) Уваровского района Тамбовской области. Располагается церковь на территории бывшей усадьбы Воейковых «Ольшанка». Храм, построенный на средства В. Н. Воейковой, бабушки известного русского художника В.Д. Поленова, был заложен в 1843 году. Его строительство окончено в 1860 году. Об этом свидетельствует «храмозданная» таблица, хранящаяся в настоящее время в музее г. Уварово Тамбовской области.

Строительство усадебного храма, задуманное А.В. Воейковым и В.Н. Воейковой, было закончено в 1825 году. Он по праву является памятником герою Отечественной войны 1812 года, генерал-майору А.В. Воейкову, мужу В.Н. Воейковой [2].

Проектированием здания церкви занимались два известных академика Академии художеств России Константин Антонович Молдавский и Роман Иванович Кузьмин [3, 4]. Храм стал результатом их совместного творчества и органично вписался в ансамбль существовавшей тогда усадьбы. В настоящее время от усадьбы «Ольшанка» остались только церковь, один из прудов и часть бывшего парка в месте расположения господского дома. Виды усадьбы в XIX веке частично сохранились на картинах, выполненных членами семьи Поленовых: М.А. Поленовой, дочерью А.В. Воейкова и В.Н. Воейковой, и ее детьми – Е.Д. Поленовой, одной из первых российских художников-иллюстраторов детской книги, и В.Д. Поленовым, знаменитым художником-пейзажистом. На рис. 1 представлен вид церкви, нарисованной М.А. Поленовой в период ее строительства в 1854 году, а на рис. 2 – вид церкви, изображенной В.Д. Поленовым в 1880 году, то есть через 20 лет после окончания ее строительства.

В настоящее время церковь Воскресения Христа Спасителя является объектом культурного наследия Тамбовской области и относится к уникальным памятникам архитектуры «русского историзма». Об этом свидетельствует степень причастности к объекту культурного наследия выдающихся людей XIX века.

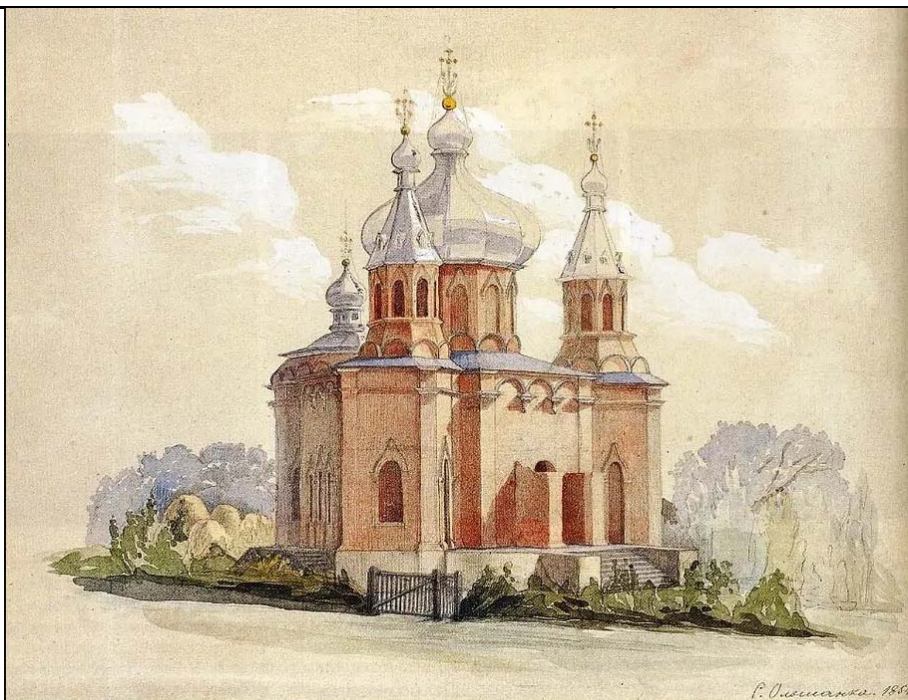


Рис. 1. Церковь Воскресения Христа Спасителя в селе Олышанка (М.А. Поленов, 1854 г.)



Рис. 2. Церковь у озера (В.Д. Поленов, 1880 г.)

За время своего существования в XX веке церковное здание претерпело большое количество различных негативных воздействий. До 1923 года церковь являлась действующим храмом. Окончательно она была закрыта в 1930 году. Затем здание использовалось в качестве склада для хранения зерна. После 1945 года здание больше не эксплуатировалось и находилось до конца XX века в бесхозном состоянии. После возвращения храма Русской православной церкви были предприняты некоторые попытки по реставрации здания. В 1989 году московскими реставраторами в частном порядке была разработана научно-проектная документация по реставрации объекта. В результате научных исследований были оценены общее состояние здания, имеющиеся в нем утраты и определён общий объем ремонтно-реставрационных работ. Однако эти работы из-за отсутствия финансирования не были проведены. В 2012 году на основе визуального осмотра здания был определен необходимый перечень первоочередных

противоаварийных работ, частично выполненных. Следует отметить, что работы производились без разработки какой-либо проектной документации. В результате этого были утрачены и искажены отдельные оригинальные элементы на фасадах здания. В 2022 году по просьбе Департамента по государственной охране объектов культурного наследия Тамбовской области сотрудниками Тамбовского государственного технического университета было проведено подробное исследование здания церкви. Так как здание весьма продолжительное время использовалось не по своему первоначальному назначению, а позже находилось в бесхозном состоянии, задачами обследования являлись оценка технического состояния несущих и ограждающих конструкций здания на предмет определения возможности их дальнейшей эксплуатации, а также установление видов и объемов работ, необходимых при реставрации храма. Были выполнены необходимые обмерные работы, определены изменения, возникшие за время эксплуатации в планировочных и конструктивных решениях, оценено техническое состояние несущих и ограждающих элементов и их эксплуатационная надежность, а также установлен перечень необходимых ремонтно-реставрационных работ по восстановлению объекта.

Архитектурно-стилевая характеристика храма. Структуру храма нельзя отнести к традиционным по своей композиции усадебным церквям XIX века. Посвящение храма Воскресению Христову определило его особые архитектурные и стилиевые решения. Планировочное решение церкви соответствует структуре ротонды Воскресения над Гробом Господним в Иерусалиме.

Нетипичный правильный объем храма определяется шестигранником наружных стен, опирающихся на массивные приподнятые стены подвального помещения. Перекрытия объемов церкви представляют собой системы цилиндрических сводов, лежащих на наружных стенах и на шести внутренних кирпичных столбах, объединенных между собой арками. Центральный объем здания завершается двенадцатигранным барабаном, имеющим глухие грани, а также грани с оконными проемами. Барабан увенчан развитым белокаменным карнизом, над которым расположена массивная глава в виде купола с оригинальным переходом от купола к кресту.

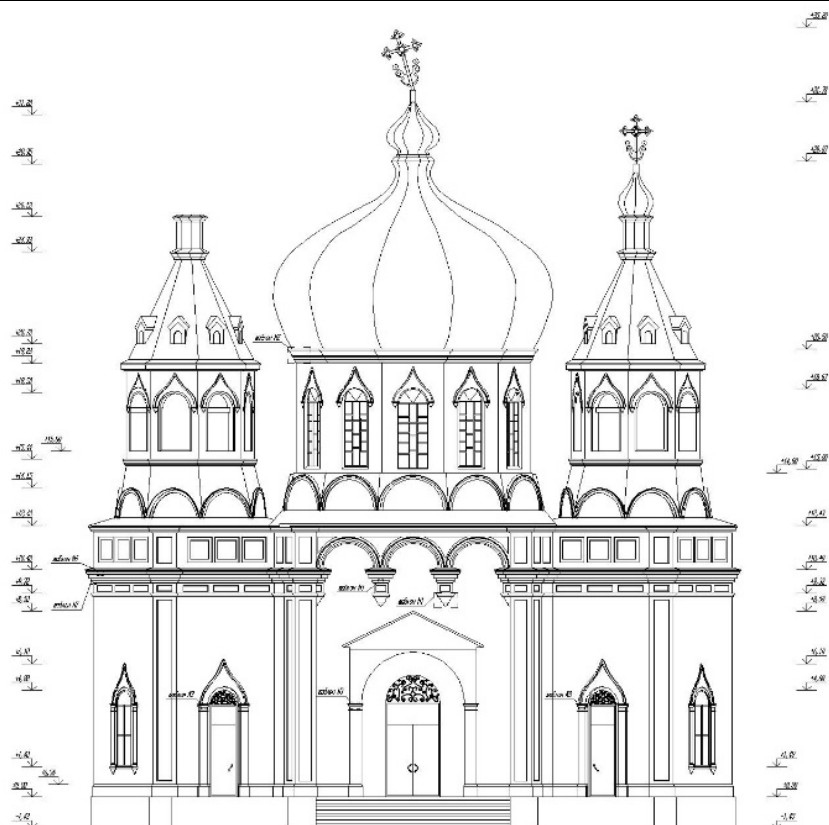
К основному объему здания примыкают два объема колоколен и апсиды. Колокольни завершены восьмигранными шатрами с луковичными главками и крестами. Конструкции покрытия апсиды полностью утрачены. Их первоначальный вид сохранился только на рисунках, выполненных членами семьи Поленовых (см. рис. 1). Завершение апсиды в некоторой мере повторяло форму основной главы храма.

Над землей храм приподнят на трехступенчатый цоколь. С западной стороны храма на паперти размещен главный вход в здание. Ранее вход был украшен порталом с шатровым покрытием и крестом. Об этом свидетельствует изображение храма на картине В.Д. Поленова (см. рис. 2). В настоящее время шатровое покрытие утрачено; во время противоаварийных работ, выполненных после 2012 года, оно было заменено на простое двухскатное покрытие. Паперть центрального входа имела значительные повреждения, в процессе противоаварийных работ она была переустроена. Качество выполненных работ не отвечает требованиям, предъявляемым к реставрационным работам на объектах культурного наследия. В здании кроме главного входа имелось два боковых входа, расположенных на гранях стен, примыкающих к апсиде. В настоящее время крыльца этих входов утрачены. На западном фасаде здания имеются также два входа на колокольни.

Подвальное помещение храма перекрыто сводами, опирающимися на шесть опор и центральный столб, размещенный в центре шестигранника. Входы в подвал находятся на северной и южной сторонах фасадов здания.

При обследовании здания были выполнены подробные обмерные чертежи. На рис.3 приведены обмерные чертежи западного и восточного фасадов здания, а на рис.4 – обмерный план храма в уровне его первого яруса и план подвальных помещений.

а



б

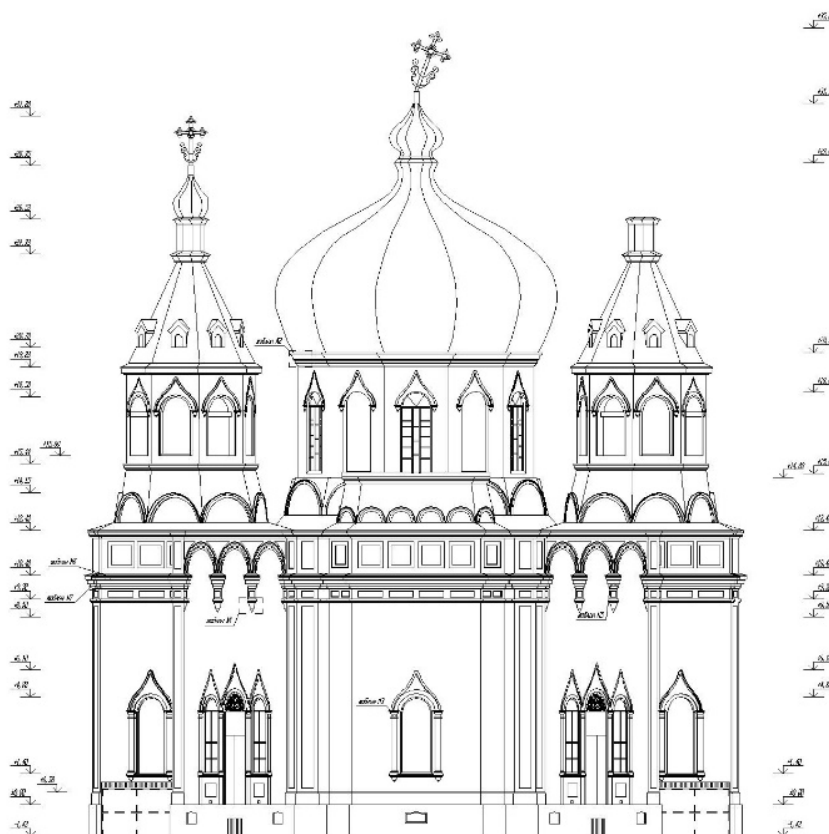


Рис. 3. Обмерные чертежи фасадов здания (2022 год):
а – западный фасад; б – восточный фасад

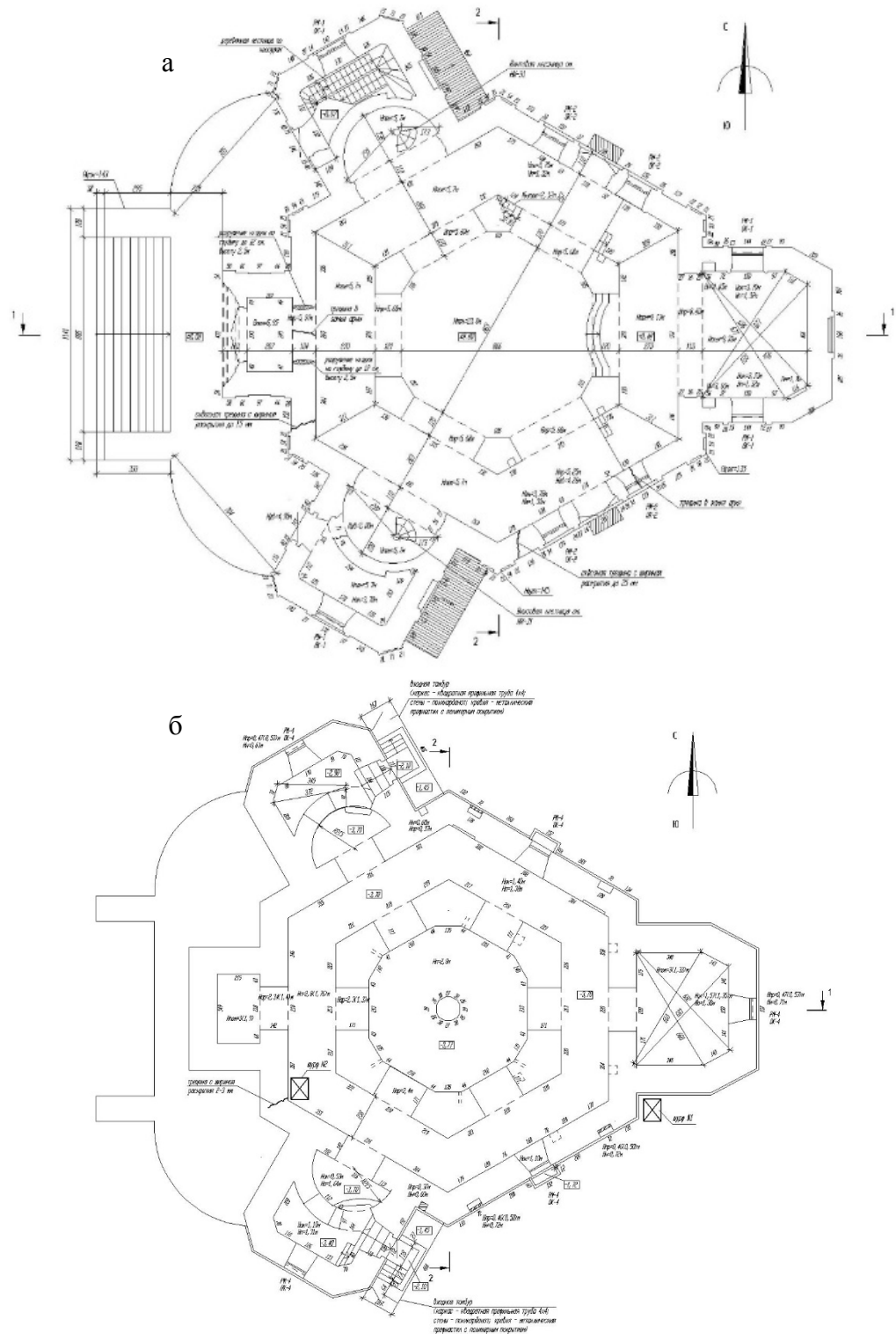


Рис. 4. Обмерные планы первого яруса храма (а) и подвальных помещений (б), выполненные в 2022 году

Фасады храма, разработанные академиком Р.И. Кузьминым, имеют во многом уникальные решения. Оригинально решены завершение главного купола храма в виде шара и фигурного креста, покоящихся на массиве основного купола, а также колоколен в виде русских шатровых покрытий. Все объемы в уровне первого яруса храма выполнены со скошенными «на фаску» лопатками. По центру лопатки декорированы нишами. На уровне верха первого яруса устроены полосы карнизов, зрительно разделенные между собой нишами-«ширинками». Верхняя часть колоколен

оформлена профилированными нишами. Главный вход храма выполнен с полуциркульной кирпичной перемычкой и декорирован профилированным наличником, опирающимся на пилястры. Все остальные дверные и оконные проемы перекрыты арочными перемычками и обрамлены кирпичными наличниками с завершением килевидными кокошниками.

Архитектурные решения фасадов хорошо видны на рис. 3 и фотографии храма, выполненной авторами в 2022 году (рис. 5).



Рис. 5. Церковь Вознесения Христа Спасителя.
Современное состояние храма (фото авторов), 2022 г.

В целом результаты анализа объемно-планировочного и архитектурно-художественного решения храма свидетельствуют об его уникальности, таланте его авторов – академиков К.А. Молдавского и Р. И. Кузьмина.

Техническое состояние здания и объем необходимых ремонтно-реставрационных работ. Внешний вид здания в период обследования приведен на рис. 5. При обследовании здания были выполнены визуальные и инструментальные исследования.

В целом общий визуальный осмотр здания показал, что храм имеет значительные утраты и повреждения. В настоящее время утраченными являются купол, луковичи и крест апсиды, луковица и крест одной из колоколен. Значительные повреждения имеют кровельное покрытие здания, и особенно его центрального барабана. Утраченными являются крыльца боковых входов в храм, изменены конструктивные решения входов в подвальные помещения. Восстановленная при противоаварийных работах паперть главного входа во многом не отвечает ее первоначальному облику. Существенные утраты и изменения имеют декоративные элементы здания. Изменен облик покрытия главного входа в здание. Искажены архитектурные решения заполнения оконных и дверных проемов. Конструкции заполнения выполнены из современных, чуждых облику храма материалов.

Все перечисленное является следствием как бесхозного состояния храма, так и противоаварийных работ, выполненных без необходимой проектной документации. В проектной документации на реставрацию необходимо предусмотреть работы по исправлению допущенных ошибок и несоответствий по отношению к первоначальному облику церкви.

На техническое состояние здания существенное влияние оказывало и оказывает его ненадлежащее использование. Здание в течение 100 лет не отапливалось. Воздействие низких температур, постоянные протечки атмосферных осадков через кровельное покрытие привели к повреждениям и внутренним конструкциям здания. В результате разрушились деревянные перекрытия хоров, в аварийном состоянии находятся внутренние лестницы, повреждены и непригодны к эксплуатации деревянные полы первого яруса храма. Наблюдаются повсеместные разрушения элементов внутренней штукатурной отделки. В сводах надземной части здания в связи с воздействием на них атмосферной влаги и с постоянно происходящими процессами замораживания-оттаивания имеются повреждения и разрушения тела сводов с выпадением отдельных кирпичей. В перекрытиях галереи имеются трещины в местах их сопряжения с наружными стенами.

Были выполнены подробные инструментальные исследования элементов несущего остова здания: фундаментов, наружных стен основной части храма, стен апсиды и башен-колоколен, внутренних столбов, сводчатых перекрытий.

Фундаменты выполнены ленточными из глиняного обожженного кирпича на известковом растворе. Кирпич по характеристикам отвечает сорту «красный» [5]. Кладочный раствор в своем составе имеет добавки из дробленой кирпичной крошки (цемянки). В теле фундаментов, находящихся ниже уровня пола подвала, и в стенах подвального помещения нет деформаций и повреждений, связанных с недостаточной несущей способностью. Имеющиеся отдельные незначительные трещины стабилизированы. Их происхождение обусловлено в основном неравномерными деформациями грунтов основания, происходившими на этапе строительства здания. В стенах подвала отмечены отдельные следы увлажнения поверхностными водами из-за отсутствия отмостки по периметру здания. Грунты у наружных поверхностей стен подвала увлажнены. По результатам обследования установлено, что фундаменты и стены подвала имеют работоспособное состояние и пригодны для дальнейшей надежной эксплуатации.

Стены здания выполнены из глиняного обожженного кирпича на известковом растворе с добавлением кирпичной крошки (цемянки). Кирпичи соответствуют сорту «красный». В стенах имеются отдельные трещины, связанные с ранее происходившими деформациями оснований. Стены имеют работоспособное состояние и пригодны к дальнейшей безопасной эксплуатации.

Внутренние столбы здания, как стены и фундаменты, выполнены из кирпича сорта «красный» на известковом растворе. Повреждения и разрушения, связанные с недостаточной несущей способностью, отсутствуют. Состояние столбов работоспособное.

Перекрытия над подвальными помещениями, галереями, апсидой устроены сводчатыми различных конструктивных решений. Над центральным барабаном имеется купольный свод. Своды выполнены из кирпича сорта «красный» на известковом связующем. Установлено, что состояние сводов над подвалом и главного купольного свода работоспособное, техническое состояние других сводчатых покрытий в основном ограничено работоспособное.

При инструментальных исследованиях были определены прочностные характеристики кирпичной кладки всех несущих элементов остова. Установлено, что прочность кирпичей соответствует маркам от М50 до М75, а прочность кладочного раствора – маркам от М20 до М30. Такая высокая, по меркам XIX века, прочность указывает на качественный уровень процесса изготовления кирпичей, которые использовались при строительстве, и подготовки известковых кладочных растворов.

Заключение. Результаты обследования конструкций несущего остова здания церкви показали, что он обеспечивает необходимую жесткость и устойчивость как отдельных его элементов, так и здания в целом. Несущая способность всех элементов остова полностью обеспечивается. Следует отметить, что такое сохранившееся в течение 160 лет состояние несущих конструкций во многом связано с высоким, по меркам XIX века, качеством строительных материалов и изделий, а также с качественным выполнением строительных работ [6, 7]. Здание церкви можно рассматривать в качестве образцового объекта не только по его оригинальным архитектурным решениям, но и по их конструктивному исполнению.

Выполненные в 2022 году подробные научные исследования церкви как объекта культурного наследия позволили определить необходимый объем ремонтно-реставрационных работ. В основном предлагаемый перечень работ связан с восполнением обнаруженных утрат и с восстановлением поврежденных и разрушенных ограждающих конструкций. Предлагаемые мероприятия позволят продлить жизнь уникальному памятнику усадебной храмовой архитектуры.

Список литературы

1. Азбука паломника. Тамбовская область (храмы). – URL: https://azbyka.ru/palomnik/Тамбовская_область_%28храмы%29. – Дата обращения: 09.01.2025.
2. Отечественная война 1812 года: энциклопедия. – Москва : РОССПЭН, 2004. – 880 с.
3. Кондаков, С.Н. Список русских художников к юбилейному справочнику Императорской академии художеств. Часть II, биографическая. / С.Н. Кондаков. – Санкт-Петербург : Товарищество Р. Голике и А. Вильборг, 1915. – 454 с.
4. Хомутецкий, Н.Ф. Материалы к биографии архитекторов С.Л. Шустова и Р.И. Кузьмина / Н.Ф. Хомутецкий // Архитектурное наследство. – 1955. – №7. – С.197–214.
5. Леденев, В.И. Физико-технические основы эксплуатации кирпичных стен : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 270100 «Строительство» / В.И. Леденев, И.В. Матвеева, П.В. Монастырев. – Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008.
6. Андрианов, К.А. Оценка технического состояния несущих конструкций церкви Воскресения Христа Спасителя в с. Красное Знамя Тамбовской области / К.А. Андрианов, И.В. Матвеева, С.В. Обухов // Актуальные вопросы развития строительной отрасли, экологической и промышленной безопасности : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2023. – С. 7–12.
7. Матвеева, И.В. Особенности строительства усадебных храмов, возведенных в XIX веке на территории Тамбовской губернии / И.В. Матвеева, С.В. Обухов // Современные проблемы материаловедения : сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции. – Липецк : Липецкий государственный технический университет, 2024. – С. 191–201.

References

1. The alphabet of the pilgrim. Tambov region (temples). – URL: https://azbyka.ru/palomnik/Тамбовская_область_%28храмы%29. – Date of reference: 09.01.2025.
2. The Patriotic War of 1812: an encyclopedia. – Moscow : ROSSPEN, 2004. – 880 p.
3. Kondakov, S.N. The list of Russian artists for the jubilee handbook of the Imperial Academy of Arts. Part II biographical / S.N. Kondakov. – St. Petersburg : Partnership of R. Golike and A. Vilborg, 1915. – 454 p.
4. Khomutetsky, N.F. Materials for the biography of architects S.L. Shustov and R.I. Kuzmin / N.F. Khomutetsky // Architectural heritage. – 1955. – No. 7. – P.197–214.
5. Ledenev, V.I. Physico-technical fundamentals of brick wall operation: a textbook for students studying in the field 270100 «Construction» / V.I. Ledenev, I.V. Matveeva, P.V. Monastyrev. – Moscow : Publishing House of the Association of Construction Universities, 2008.
6. Andrianov, K.A. Assessment of the technical condition of the load-bearing structures of the Church of the Resurrection of Christ the Savior in the village of Krasnoe Znamya, Tambov region / K.A. Andrianov, I.V. Matveeva, S.V. Obukhov // Actual issues of the development of the construction industry, environmental and industrial safety : Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. – Vologda : Vologda State University, 2023. – P. 7–12.
7. Matveeva, I. V. Features of the construction of manor temples erected in the 19th century on the territory of the Tambov province / I.V. Matveeva, S.V. Obukhov // Modern problems of materials science : Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference. – Lipetsk : Lipetsk State Technical University, 2024. – P. 191–201.

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

Лапшина Елена Геннадьевна,
кандидат архитектуры, профессор,
зав.кафедрой «Основы архитектурного
проектирования»
E-mail: elenlaps@mail.ru

Димakov Николай Дмитриевич,
ассистент кафедры «Основы
архитектурного проектирования»
E-mail: dimakov-1996@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

Lapshina Elena Gennadyevna,
Candidate of Science in Architecture,
Professor, Head of the department
«Fundamentals of Architectural Design»
E-mail: elenlaps@mail.ru

Dimakov Nikolay Dmitrievich,
Assistant of the department «Fundamentals of
Architectural Design»
E-mail: dimakov-1996@mail.ru

ДЕРЕВЯННАЯ ВЫСОТНАЯ АРХИТЕКТУРА: БАШНИ

Е.Г. Лапшина, Н.Д. Димаков

Анализируются предпосылки и условия появления деревянной высотной архитектуры, ее особенности. Изучение возможностей дерева как строительного материала для возведения высоток позволяет раскрыть перспективы использования этого возобновляемого строительного материала.

Ключевые слова: высотные сооружения, дерево, архитектура, башня

WOODEN HIGH-RISE ARCHITECTURE: TOWERS

E.G. Lapshina, N.D. Dimakov

The article analyzes the prerequisites and conditions for the emergence of wooden high-rise architecture and its features. Studying the possibilities of wood as a building material for the construction of high-rise buildings reveals the prospects for using this renewable building material.

Keywords: high-rise buildings, wood, architecture, tower

Изучение истории развития высотных сооружений из дерева позволяет выделить несколько этапов [1]. Первый, так называемый «исторический», этап связан преимущественно с возведением храмов. В России это многоярусные христианские храмы и колокольни. В Китае и Японии – многоярусные пагоды. Самым древним деревянным сооружением Японии является пагода храма Хорю-дзи (рис. 1). Начало второго, «нового», этапа развития высотного строительства из дерева характеризуется появлением в конце XIX – начале XX века башни особого назначения – это сооружение, используемое в качестве радиомаяка. Рассмотрим примеры подобных сооружений.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ. Самым высоким радиомаяком из дерева стала башня, построенная немцами в Гливице [2], в Польше, в 1935 году. Эта башня (рис. 2, 3) по силуэту напоминает Эйфелеву башню, возведенную в Париже из металла в конце XIX века. Однако у нее особая история возведения и отличная от металлической конструкции Эйфеля структура.

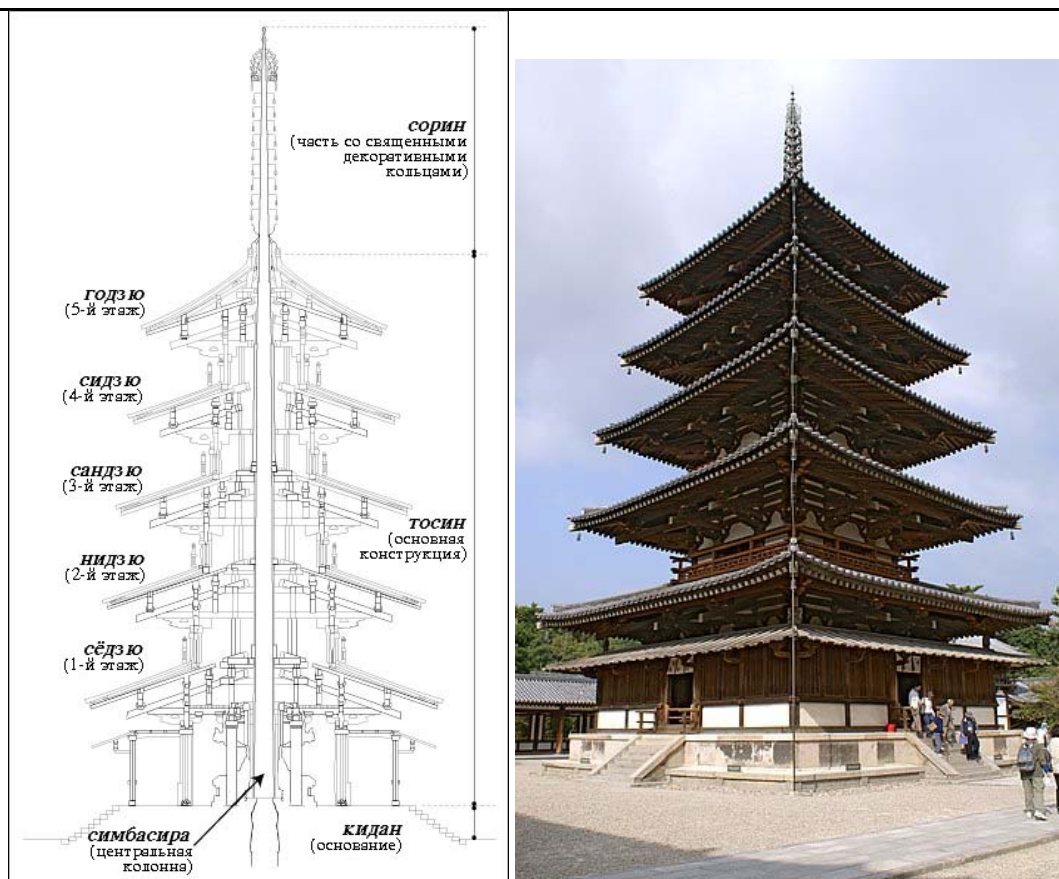


Рис. 1. Сечение и внешний вид пагоды храма Хорю-дзи. 32,45 м. Япония. 700 г.



Рис. 2. Радиобашня в Гливице, Польша. Высота 118 м. 1935 г.



Рис. 3. Фрагменты радиобашни из дерева в Гливицах

История строительства вышки радиостанции в городе Гливице наполнена парадоксами. Башню построила немецкая фирма Lorenz из строительного материала, завезенного из Советской России. Это деревянное чудо высотой 118 м сооружено из сибирской лиственницы, особенно стойкой к действию вредителей и атмосферным воздействиям, и увенчано 8-метровым шпилем. Сначала здесь разместили антенны средневолнового диапазона. В 1955 году сюда поместили аппаратуру для глушения «Радио Свободная Европа». Сегодня вместо них поставлены антенны сотовых операторов, а также маломощного передатчика FM диапазона [3]. В тело башни встроено четыре площадки – первая на высоте 40,4 м, далее – на высоте 55, 3 и 80 м. Самая верхняя площадка располагается на высоте 109 м и характеризуется очень маленьким размером, ее габариты всего 2,13×2,13 м. К ней ведет деревянная лестница из 365 ступеней. Балки мачты соединяют 16 тыс. лиственничных болтов.

История этого самого высокого сооружения, построенного из дерева, связана с особой датой – началом Второй мировой войны 1 сентября 1939 года. На тот момент Гливице был приграничным городом в Силезии, воеводстве на юге Польши. Там, вблизи границы с Германией была построена в 1935 году Гливицкая радиомачта как немецкая радиостанция [4]. Удивительно то, что деревянная конструкция башни пережила все катастрофы Второй мировой войны. В настоящее время башня в Гливице является национальным достоянием Польши и периодически проходит реконструкцию. Она служит объектом туризма, с 2008 года в ней устроено отделение музея. Территорию вокруг вышки благоустроили в 2009 году, и она стала элементом городского пейзажа. В темное время суток вышка освещается мощными прожекторами, она становится видна не только в городе, но и в округе. Сегодня территорию рядом с радиостанцией называют «Лучшим общественным пространством Силезского воеводства – 2010» (рис. 4) в категории «Градостроительство», с 15.03.2017 года она включена в список исторических памятников [5].

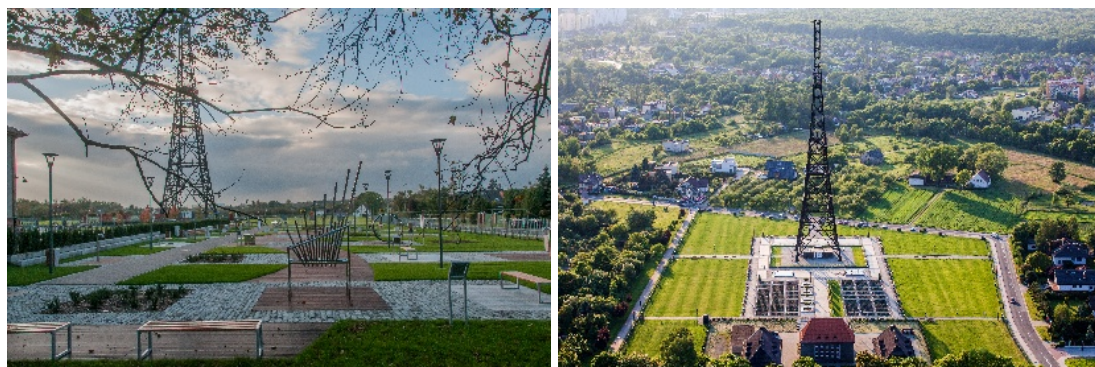


Рис. 4. Музей в Гливице

В России свою башню предложил В.Е. Татлин (рис. 5, а б). Его проект памятника, посвященного III Интернационалу, предполагал возведение башни из металла высотой 400 м. Однако в 1920 году была построена только модель башни, выполненная из

дерева, высота ее составила 5 м [6]. Далее неоднократно предпринимались попытки возвести башню Татлина в натуральную величину, в том числе – построить ее из дерева.

В конце XX века в городе Пензе, где учился В. Татлин (1905-1910 гг.), была выполнена авторская реконструкция модели (рис. 6, а, б). Она построена из дерева, имеет высоту 5 м и поставлена на подиум высотой 1,5 м. Эта модель – реконструкция башни Татлина – с 1993 года экспонируется в Государственной Третьяковской галерее на Крымском мосту в г. Москве.

Башня Татлина имеет оригинальную форму [7, 8]. От всех остальных высоток она отличается своей динамикой, асимметрией. Это наклонная форма в виде гномона (солнечных часов), мачта которой обращена на северную Полярную звезду. Есть и другая важная особенность башни. Ее форма не статична, а подвижна. В теле сложной пространственной решетки подвешено несколько объемов, которые вращаются с разной скоростью вокруг вертикальных осей. Таким способом 400-метровая башня должна была получить возможность размещения в полости сложной пространственной решетки в виде коноида четырех медленно вращающихся зданий, их форма – куб, пирамида, цилиндр и полусфера (расположены последовательно снизу вверх).

В полусфере предполагалось разместить телеграф, который, по задумке Татлина, позволил бы транслировать световые буквы сообщений на облака. По сути, это идея башни-телемаяка.

Владимир Татлин показывал свою модель в декабре 1920 года в Москве. Тогда же в Москве началось строительство радиомаяка Владимиром Шуховым.

Шухов строил свою башню из металла [9]. Башня Шухова была собрана из секций, геометрически представлявших собой гиперboloид. В отличие от наклонной башни Татлина шуховская башня – это вертикаль, имеющая симметричную относительно вертикальной оси форму (рис. 7, а). Аналогично с вертикальной осью симметрии была выстроена и Эйфелева башня в Париже (рис. 7, б). Шухов и Эйфель делали расчеты для конструкции башни, выполненной из металла. Такие башни имеют высоту гораздо больше, чем деревянные конструкции.

а



б

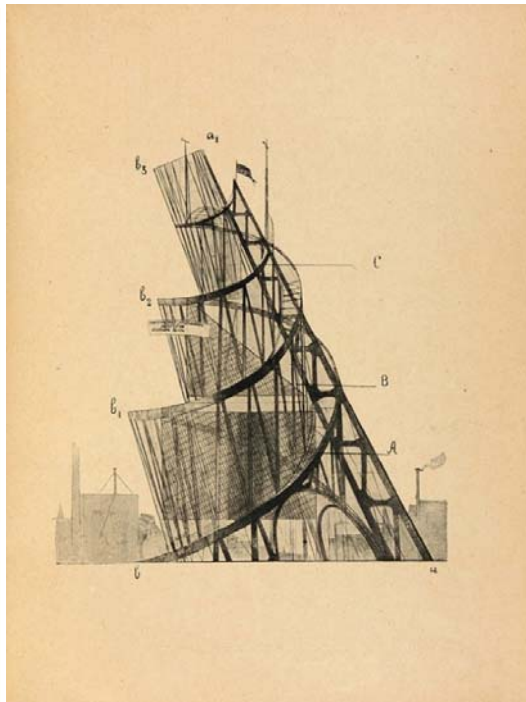


Рис. 5. Памятник III Интернационала. В.Татлин. Петроград. 1920 г.
Деревянная модель, высота 5 м (а) и эскиз башни высотой 400 м (б)



Рис. 6,а. Памятник III Интернационала. Модель–реконструкция, дерево (5 м).
Пенза (ПХУ) – Москва (ГТГ). 1992-1993 гг.

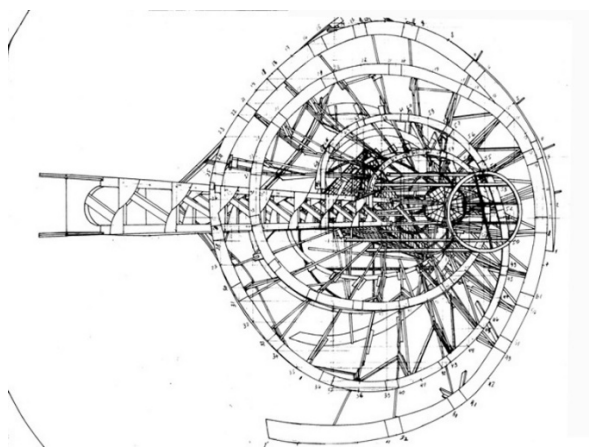


Рис. 6, б. Чертеж авторский (вид сверху) и фрагмент деревянной модели башни Татлина

Остается прояснить вопрос, строил ли из дерева свои башни Владимир Шухов. Он первым запатентовал стальную гиперболическую конструкцию в строительной отрасли. Всего Шухов построил не один десяток башен, в России – более двухсот гиперболических башен (рис. 8, а, б). Первую башню высотой 25 м он возводил для Всероссийской промышленной и художественной выставки в Нижнем Новгороде (рис. 8, а). Затем эту башню купил меценат и промышленник Нечаев-Мальцов и увез в свое имение Полибино, в Липецкую область, где она и была поставлена близ Куликова поля.

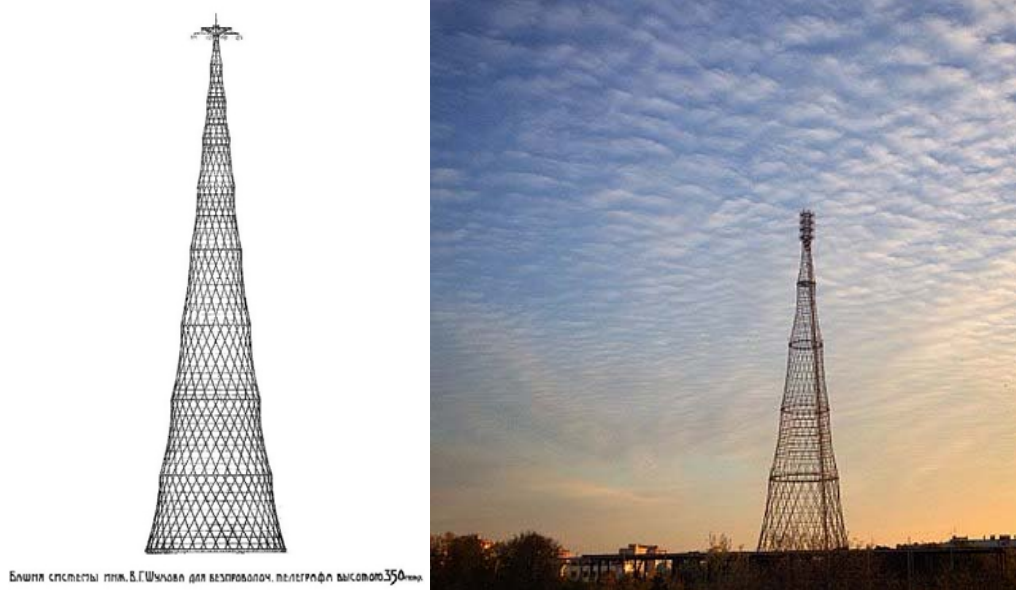


Рис. 7, а. Башня В.Шухова. Проект (350 м) и реализация (160 м), Москва. 1920-1922 гг.

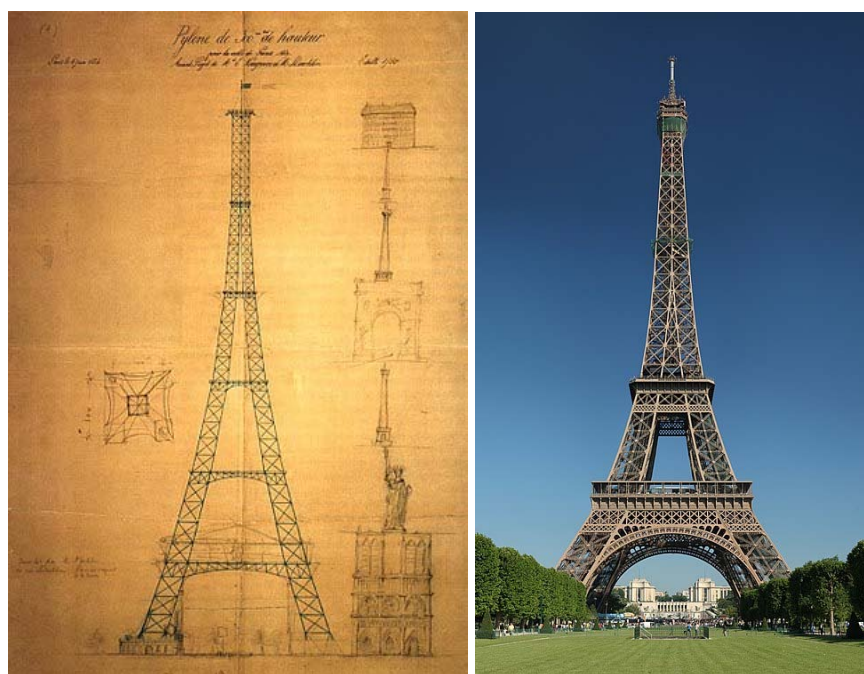


Рис. 7, б. Башня Эйфеля. Париж. 330 м. 1897-1899 гг.

а



б



Рис. 8. Водонапорные башни Шухова. Россия. Рубеж XIX-XX вв.

Гиперболическая конструкция башни действительно может быть смонтирована из дерева. Известен проект деревянной градирни в Североуральске (рис. 9).

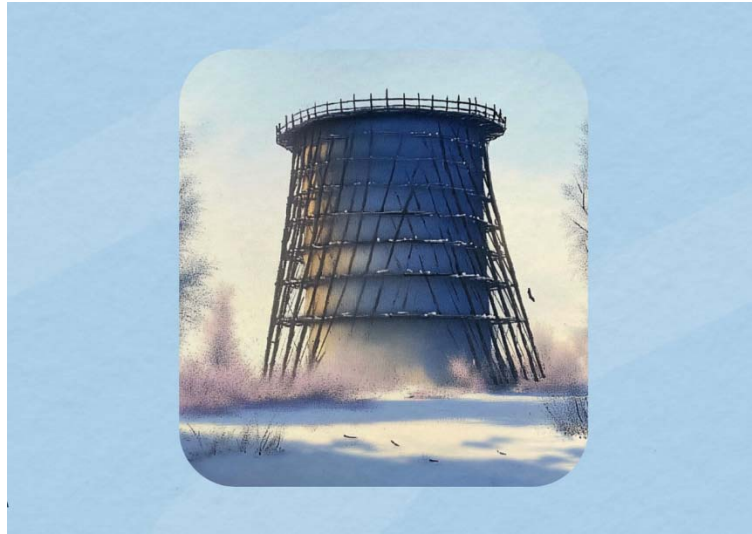


Рис. 9. Деревянная градирня в Североуральске, Свердловская область. 1947 г.

Две градирни, охлаждающие воду для котлов ТЭЦ, построили из дерева уже после смерти В. Шухова. В 1964 году, когда предприятие законсервировали, одну из градирен демонтировали. Другая сохранилась до настоящего времени [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ. Деревянная архитектура на первом «историческом» этапе своего развития выработала традиционные приемы и конструктивные схемы, позволявшие веками возводить многоярусные сооружения в виде колоколен или пагод. В этот период из дерева строили разнообразные здания и сооружения во многих городах и странах. Особенно это было характерно для России, где было много строительного леса. Такой же особенностью отличалась и Канада.

На следующем, «новом», этапе особенной чертой деревянной архитектуры становится выработка приемов, которые позволяют улучшить свойства дерева как строительного материала, его конструктивные возможности искусственным образом. Так появляются новые конструктивные задачи и новые строительные материалы – клееная древесина, ДСП, CLT и прочие. Рассматриваются экологические проблемы «зеленого» строительства. Для большепролетных зданий и сооружений используются гнутоклееные балки. Однако строительство высотных зданий и сооружений на данном этапе не распространено. Имеют место лишь единичные случаи. Так, «не смотря на развитие материалов на основе древесины, методов расчета конструктивных систем из этих материалов, технологий их производства, применение дерева в XX веке отошло на второй план, уступив первенство железобетону, металлу, кирпичу» [1, с.52]. Известны отдельные примеры строительства многоэтажных зданий и сооружений с деревянными несущими конструкциями, относящиеся к началу XX века, это 8-этажный «дом Батлер» в Миннеаполисе, Бостон, 1906 г., и к XXI веку, это пагода Тяньнин, Чанчжоу, Китай, 2007 г. (рис.10). «В отличие от исторических китайских пагод, в пагоде Тяньнин используется современная несущая система, состоящая из металло-деревянных ферм, связанных между собой в жесткую рамную конструкцию, закрепленную на бетонном основании» [1, с.53]. При строительстве пагоды были использованы ценные породы дерева, привезенные из Новой Гвинеи. Гибридные конструктивные системы стали возможны благодаря появлению новых строительных материалов и их совместной работе, которая организуется теперь после выполнения расчетов усовершенствованными методами.



Рис. 10. Пагода Тяньнин, Китай. 153,79 м. 2007 г.

Развитие строительных технологий позволило поставить новые задачи на современном этапе, когда необходимо решать экологические и экономические проблемы. Древесина как возобновляемый потребляемый ресурс стала превышать объемы ее воспроизводства. Появилась концепция «устойчивого развития», необходимость сбалансированного антропогенного влияния на окружающую среду. Развивается «зеленое строительство», которое связано с появлением экологических материалов (древесины), развиваются безотходные методы строительства.

Высотные здания и сооружения из дерева все чаще стали появляться в гражданской архитектуре на современном этапе развития. Начало его связывают с 2009 годом, когда в Лондоне был построен девятиэтажный деревянный дом Standthaus. В дальнейшем деревянные высотки стали рассматриваться как перспективное направление развития строительства и архитектуры.

Высотные сооружения из дерева – это искусственная форма, собранная из природных материалов. Однако не только возобновляемость дерева в природе делает такие сооружения подобными природным формам. Есть в закономерностях их формообразования подобие растительным, биоморфным законам развития. Стебель бамбука вполне может встроиться в гиперболические сетки башни Шухова как конструктивный элемент. Суставы скелета животной формы задают принцип шарнирных соединений в строительной конструкции.

В многоэтажном деревянном строительстве на сегодня лидируют Канада, Норвегия, Финляндия, Австрия, Великобритания и США. В Европе создана программа «Деревянная Европа», которая предполагает увеличение доли деревянного строительства до 80 % от общего количества новостроек. В том числе в Швейцарии в 2026 году запланирован к сдаче жилой дом высотой 100 м. Немного меньше будет высота самого высокого сооружения из массива древесины в Северной Америке – это проект здания в канадском городе Торонто высотой 90 м. Главным требованием деревянного высотного строительства в современных условиях считается уменьшение сроков строительства и расхода ресурсов. Так, 25-этажный небоскреб в городе Милуоки по проекту Ascent MKE был возведен из массива дерева за 4 месяца и достиг высоты 86, 6 м. Это на метр больше, чем знаменитый норвежский деревянный небоскреб Mjøstarnet.

Среди высотных деревянных сооружений, построенных по типу башни, можно назвать ветряную электростанцию на деревянной опоре, представленную на рис. 11, а, б, в. Ее высота 150 м до верха лопасти, сделана она из древесного композита. Слои ели сложены друг на друга и скреплены стальной арматурой.

а



Рис. 11, а. Монтаж ветровой электростанции на деревянной опоре. Швеция. 105 м. 2023 г.

б



Рис. 11, б. Ветровая электростанция на деревянной опоре близ Гётеборга

Ветровая электростанция, выполненная из деревянных конструкций, уже начала выработку электроэнергии в Швеции. В составе ВЭС, расположенной недалеко от Гётеборга, – экспериментальные ветряки высотой 150 м до верха лопасти и высотой самой башни – 105 м. На сегодняшний день – это рекорд для применения деревянных конструкций в сооружениях такого рода [11]. Прочность 105-метровой башни обеспечивается 144 слоями ламинированного шпона, из которых состоят её толстые стены. На заводе, расположенном на окраине Гётеборга, тонкие слои древесины склеиваются и сжимаются вместе, чтобы получились изогнутые секции. Эти части доставляются на место, склеиваются в цилиндры, а затем укладываются друг на друга, чтобы получилась башня. Главным преимуществом турбины является то, что, используя дерево и клей, башни можно строить из небольших, легко транспортируемых модулей. Такое решение значительно упрощает строительство очень высоких башен и доставку их в самые труднодоступные места.

Создание проектов деревянных высоток набирает обороты в XXI веке. Исследуются возможности строительства высотных зданий с каркасом из деревянных конструкций в 30 и более этажей. Сложившиеся различные конструктивные системы многоэтажных зданий с применением дерева включают как полностью деревянные несущие конструкции, так и комбинированные несущие системы, где древесина объединяется с другими материалами – деревометаллические или деревобетонные варианты. Деревянные высотные сооружения также становятся востребованными.

Выводы. Определены особенности этапов формирования деревянного высотного строительства и архитектуры. Они определяются развитием строительных технологий и материалов – от натуральной древесины и традиционных технологий к композитным материалам на основе дерева, развитием новых технологий и конструктивных систем, методов расчета, изменением отношения к использованию древесины в высотном строительстве. Выявлены тенденции развития деревянной высотной архитектуры, в том числе сооружений из дерева башен.

1. Афонин, В.С. Этапы формирования мирового многоэтажного деревянного строительства / В.С. Афонин // АМТ. 2018. – №2 (43). – С.41–61.
2. Amy Tikkanen. Gliwice. Poland. World War II. 1939-1945 // Encyclopedia Britannica. – URL: <https://www.britannica.com/place/Gliwice> <https://www.britannica.com/event/World-War-II>
3. Радиомачта в Гливице. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Радиомачта_в_Гливице
4. Нападение на радиостанцию в Глайвице. – URL: https://znanierussia.ru/articles/Нападение_на_радиостанцию_в_Глайвице
5. Музей в Гливице. – URL: <https://gliwice.eu/ru/vizitnaya-kartochka/muzea-zabytki-ciekawe-miejsca/radiostanciya>
6. Лапшина, Е.Г. Башня Татлина. Опыт графической реконструкции памятника мировой архитектуры / Е.Г. Лапшина. – Екатеринбург : TATLIN. 2015. – 144 с.
7. Лапшина, Е.Г. Динамическая архитектура в пространстве современного города / Е.Г.Лапшина, Я.И.Сухов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №4 (236). – С.34–37.
8. Гайдук, А.Р. Композиционный анализ: проект памятника III коммунистического интернационала (Башня Татлина) / А.Р.Гайдук, Р.Ф.Мирхасанов, Л.С.Сабитов, В.А.Садков, М.И.Лушпаева, И.К.Киямов //Строительные материалы и изделия. – 2023. – 6(1). – С. 74–83.
9. Мирхасанов, Р.Ф. Универсальные законы композиции (искусственной и природной формы) на примере башни В.Г.Шухова / Р.Ф.Мирхасанов, В.А. Садков, С.В.Клюев, Л.Ш.Ахтямова, Л.С.Сабитов // Строительные материалы и изделия. – 2022. – 5 (5). – С. 29–41.
10. Гиперболоидные башни Шухова: наследие гениального инженера. Дзен. 2024. – URL: <https://dzen.ru/a/Z0XdODObOGyBj-J7>
11. В Швеции включились в работу деревянные ветряки // Проектирование DWGФОРМАТ, 07.01. 2024. – URL: <https://dwgformat.ru/2024/01/07/v-shvecii-vkljuchilis-v-rabotu-derevyannye-vetryaki/>

References

1. Afonin, V.S. Stages of formation of the world multi-storey wooden construction / V.S. Afonin // AMIT. – 2018. – №2 (43). – P.41–61.
2. Amy Tikkanen. Gliwice. Poland. World War II. 1939-1945 // Encyclopedia Britannica. – URL: <https://www.britannica.com/place/Gliwice> <https://www.britannica.com/event/World-War-II>
3. Radio mast in Gliwice. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Радиомачта_в_Гливице
4. Attack on a radio station in Gliwice. – URL: https://znanierussia.ru/articles/Нападение_на_радиостанцию_в_Глайвице
5. Museum in Gliwice. – URL: <https://gliwice.eu/ru/vizitnaya-kartochka/muzea-zabytki-ciekawe-miejsca/radiostanciya>
6. Lapshina, E.G. Tatlin Tower. Experience in graphic reconstruction of a monument of world architecture / E.G. Lapshina. – Ekaterinburg : TATLIN. 2015. – 144 p.
7. Lapshina, E.G. Dynamic architecture in the Space of a modern city / E.G.Lapshina, Ya.I.Sukhov // Regional architecture and engineering. – 2020. – №4(236). – P.34–37.
8. Gaiduk, A.R. Compositional analysis: project of the monument to the III Communist International (Tatlin Tower) / A.R. Gaiduk, R.F.Mirkhasanov, L.S.Sabitov, V.A.Sadkov, M.I.Lushpayeva, I.K.Kiyamov // Building materials and products. – 2023. – 6(1). – P. 74–83.
9. Mirkhasanov, R.F. Universal laws of composition (artificial and natural forms) using the example of V.G.Shukhov's Tower / R.F. Mirkhasanov, V.A.Sadkov, S.V.Klyuev, L.Sh.Akhtyamova, L.S.Sabitov // Building materials and products. – 2022. – 5(5). – P. 29–41.
10. Shukhov's hyperboloid towers: the legacy of a brilliant engineer. Dzen. 2024. – URL: <https://dzen.ru/a/Z0XdODObOGyBj-J7>
11. Wooden windmills started working in Sweden // Design DWGФОРМАТ, 07.01. 2024. – URL: <https://dwgformat.ru/2024/01/07/v-shvecii-vkljuchilis-v-rabotu-derevyannye-vetryaki/>

УДК 697.7

DOI 10.54734/20722958_2025_3_209

*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

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ И РАДОНОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ – ЗЕМЛЕСКРЕБОВ

А.М. Береговой

Установлена взаимосвязь геометрических параметров подземного пространства зданий и теплоступлений со стороны грунта, которая показала, что эффективность усвоения тепла земляного массива повышается с увеличением коэффициента компактности формы этого пространства, и особенно его высоты.

Дана оценка средним величинам тепловых потоков и удельных теплотерь через наружные ограждения наземных и подземных зданий, а также рассмотрен порядок учета расходов энергоресурсов на их эксплуатацию и выявлены особенности формирования микроклимата подземных зданий.

Сравнительная оценка воздействия радонового излучения на микроклимат помещений крупногабаритных подземных и высотных наземных зданий была выполнена путем определения и сопоставления их основного показателя радоновой безопасности (ЭРОА) во внутренней воздушной среде. В расчетной модели приняты часто наблюдаемые значения плотности потока радонового излучения через заглубленные вертикальные и горизонтальные ограждения, а также из материала этих конструкций, общепринятые величины постоянной распада радона и коэффициента сдвига радиоактивного равновесия. В допущениях использованы нормативное значение кратности воздухообмена помещений и одинаковое сопротивление радонопроницанию ограждающих конструкций рассмотренных зданий.

Установлено, что с учетом принятых допущений показатель ЭРОА помещений рассмотренного подземного здания может многократно (в 14 раз) превысить этот показатель для высотного наземного.

Приведен комплекс рекомендаций по повышению противорадоновой защиты подземного здания.

Ключевые слова:, подземные здания, землескребы, тепловые потери, радоновая безопасность, коэффициент компактности формы

APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF HEAT LOSSES AND RADON SAFETY OF UNDERGROUND RESIDENTIAL BUILDINGS–EARTH SCRAPERS

A. M. Beregovoy

An assessment of the relationship between the geometric parameters of the underground space of buildings and heat supply from the ground is given. It has been established, that the efficiency of heat absorption of an earth mass increases with an increase in the coefficient of shape compactness of the space, and especially, its height.

Based on the results of the published research, the average values of heat fluxes and specific heat losses through the external enclosing structures of above-ground and underground buildings are

estimated, as well as the procedure for accounting of energy resource costs for their operation is also given. and the features of the formation of the microclimate of underground buildings are identified.

A comparative assessment of the effects of radon radiation on the microclimate of the rooms of large-sized underground and high-rise ground buildings is carried out by determining and comparing their main indicator of radon safety (EROA) in the indoor air environment. The calculation model uses frequently observed values: the density of the radon radiation flux through buried vertical and horizontal, external enclosing structures as well as from the material of these structures, and the generally accepted values of the radon decay constant and the shift coefficient of the radioactive equilibrium.

In the assumptions the normative value of the multiplicity of indoor air exchange and the same resistance to radon penetration of the enclosing structures of the buildings under consideration are used. It has been established, that, taking into account the accepted assumptions, the EROA rate of the rooms of the reviewed underground building can be many times (14 times) higher than this indicator for a high-rise ground building. A set of recommendations for improving the protection against radon radiation of an underground building is given.

Keywords: underground buildings, earth scrapers, heat losses, shape compactness coefficient, radon safety

По имеющимся оценкам, к середине нашего столетия около двух третей населения планеты будет жить в городах, что потребует возведения на их территории дополнительной жилой инфраструктуры еще более чем на 2 млрд человек. Для такого расширения городского пространства, даже с учетом строительства небоскребов, может попросту не хватить места. Инновационному решению этой проблемы может способствовать новая архитектурно-строительная концепция строительства крупногабаритных подземных зданий, так называемых «землескребов».

Система формирования микроклимата «землескреба» и подход к определению величины его тепловых потерь имеют свои специфические особенности, в отличие от подземного здания относительно неглубокого заложения или высотных домов в плотной городской застройке, состояние воздухообмена в которых рассмотрено в [1].

Показатели микроклимата «землескреба» можно представить в виде локальных критериев эффективности единой энергетической и экологической системы (ЕЭЭС):

$$K_{ui} = f(Z_{en}(k_1, \dots, k_n), \dots, Z_{ec}(k_1, \dots, k_n))$$

$$Z_{ec} = \sum_{j=1}^n g_j^{ec} \cdot k_j^{ec},$$

$$Z_{en} = \sum_{j=1}^n g_j^{en} \cdot k_j^{en}$$

где K_{ui} – обобщенный критерий эффективности ЕЭЭС; Z_{ec} и Z_{en} – соответственно целевые функции экологических и энергетических подсистем ЕЭЭС здания; k_j^{ec} и k_j^{en} – локальные критерии эффективности этих подсистем в виде безразмерных величин; g_j^{ec} , g_j^{en} – коэффициенты весомости.

Локальные критерии k_j^{ec} обозначают восемь параметров воздушной среды здания в соответствии с требованиями санитарно-экологического паспорта строительной продукции, которые оценивают фон радиоактивного излучения ($\kappa_{пр}^{ec}$ – поток радона, κ_p^{ec} – содержание радионуклидов в строительных материалах, изделиях и грунтах κ_γ^{ec} – уровень γ -излучения после завершения отделочных работ), а также микроклимат помещений.

С целью оценки этих показателей был проведен анализ опубликованных результатов исследований микроклимата помещений подземных зданий, который показал следующее:

1. Преимуществами их возведения являются: существенная экономия энергоресурсов на отопление по сравнению с аналогичными наземными строениями, возможность сохранения исторического облика города, его уникальных построек, смягчение разрушительных воздействий технологических катастроф и стихийных бедствий (землетрясений, ураганов, резких изменений климата местности), отсутствие необходи-

мости охлаждения помещений в летний период, обеспечение безопасности населения по требованиям гражданской обороны, высокая звукоизоляция помещений, особенно востребованная вблизи шумных производств и аэропортов.

2. К сдерживающим факторам широкого распространения этих объектов относятся: высокие стоимость строительства и эксплуатационные затраты на систему обеспечения микроклимата (особенно вентиляции и способов повышения радоновой безопасности помещений), угроза подтопления последних при наводнениях, сложность эвакуации жителей в случае пожара, прогрессирующее по глубине объекта давление земли (и воды в обводненном грунте) на наружные ограждения, возможность нарушения циркадного ритма у человека и клаустрофобия в связи с отсутствием дневного света.

3. Тепловые потери через наружные ограждения у подземного здания значительно меньше, чем у наземного, находящегося под циклическим воздействием холодных масс атмосферного воздуха в зимнее время.

4. Заглубленные здания, в особенности «землескребы», в отличие от высотных наземных имеют гораздо большую площадь соприкосновения наружных ограждений с землей, которая является основным источником радонового излучения. При этом даже низкая объемная активность радона в жилых помещениях снижает иммунитет человека, по оценкам Всемирной организации здравоохранения.

5. На объемную активность радона непосредственное влияние оказывает кратность воздухообмена помещений, которая в жилых зданиях новых серий с окнами из стеклопакетов оказывается ниже, чем в домах старой застройки.

6. Воздухообмен в подземных объектах основан, как правило, на принципе механической вентиляции.

7. Основную часть индивидуальной годовой дозы облучения население получает в жилых и общественных зданиях, тогда как среднее содержание радона в приземном слое атмосферного воздуха очень мало.

8. Величина дозы облучения радоном в помещениях может быть существенно снижена с помощью строительных технологий.

В связи с такими особенностями формирования микроклимата крупногабаритных подземных зданий, задачей настоящего исследования явилась разработка подходов к оценке тепловых потерь и воздействия радонового излучения на микроклимат их помещений в отличие от зданий наземного типа.

1. Подход к оценке тепловых потерь. Результаты проведенного анализа позволили установить взаимосвязь геометрических параметров подземного пространства зданий и теплопоступлений со стороны грунта, а также дать сравнительную оценку средним величинам тепловых потоков и удельных теплотерь через наружные ограждения наземных и подземных зданий (табл. 1, 2).

Т а б л и ц а 1

Зависимость коэффициента $K_{\text{подз}}$ от геометрических параметров подземного здания (глубины z , ширины x и длины y , м)

Неизменяемые параметры	x	y	z	$K = S^{\text{отр}} / V$
$x = 20$ $y = 100$			9 (3 эт.)	0,34
			27 (9 эт.)	0,19
			54 (18 эт.)	0,16
			108 (36 эт.)	0,14
$y = 50$ $z = 2,5$	10			0,64
	14			0,58
	22			0,53
$x = 10$ $z = 2,5$		30		0,67
		50		0,64
		90		0,62

Тепловой поток Q , Вт/м², и удельная величина теплопотерь q , Вт/м²,
от общей площади здания

Величина Q в подземных зданиях		Величина q в наземных зданиях			
Из недр земли	От наружных ограждений в грунт	1-2-этажные здания с невысоким уровнем тепловой защиты		Здания с высоким уровнем тепловой защиты	
		$t_n = -25^\circ\text{C}$	$t_n = -30^\circ\text{C}$	$t_n = -25^\circ\text{C}$	$t_n = -30^\circ\text{C}$
$3,587 \cdot 10^{-2}$	1,06–5,31	213	230	173	177

В подземной части здания тепло земляного массива воспринимается со всех контактирующих с землей поверхностей ограждений, тогда как в наземной – преимущественно с тех из них, которые подвергаются солнечному облучению. Поэтому уменьшение коэффициента компактности формы подземных зданий и сооружений $K_{\text{подз}} = S^{\text{отп}}/V$, в отличие от наземных, снижает их тепловую эффективность, поскольку наружные ограждения таких объектов представляются более тепло-воспринимающими, чем теплоотдающими конструкциями.

Результаты расчета показали, что при условии равенства между собой сопротивлений теплопередаче всех наружных ограждений подземного помещения и теплопоступлений через них со стороны грунта эффективность использования тепла земли повышается с уменьшением размеров подземного пространства и особенно заметно по мере снижения этажности подземного объекта.

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что в отапливаемых подземных зданиях, которые в отличие от наземных считаются более энергосберегающими, тепловой поток из недр земли за счет тепла земляного массива на несколько порядков меньше, чем от наружных ограждающих конструкций в грунт.

2. Подход к оценке радоновой безопасности. Для заглубленных помещений наземных гражданских зданий инженерный метод обеспечения требуемых радонозащитных характеристик зданий и комплекс расчетов радонового излучения с определением его показателя ЭРОА представлены в работе [2]. Данный показатель характеризует среднегодовую эквивалентную равновесную объёмную активность изотопов радона во внутренней воздушной среде. Согласно нормам радиационной безопасности НРБ-99/2009, в помещениях эксплуатируемых зданий жилищного и общественного назначения этот показатель не должен превышать допустимое значение, равное 200 Бк/м³.

В упомянутой работе было установлено, что для выполнения условия $\text{ЭРОА}_{\text{расч}} \leq \text{ЭРОА}_{\text{доп}}$ требуется, чтобы плотность потока радона q_n , Бк/(м²·с), проникающего из грунта, не превышала допустимой величины $q_{n \text{ доп}}$.

$$q_{n \text{ доп}} = [\text{ЭРОА}_{\text{расч}} \cdot V \cdot (\lambda_{Rn} + n_o) - \sum_{i=1}^{I=6} q_i \cdot S_i \cdot F] / S_n \cdot F.$$

В отличие от небольших по размерам заглубленных помещений в подземных крупногабаритных объектах воздействию радонового излучения подвергается намного большая поверхность наружных ограждений, что значительно ухудшает экологические показатели их внутренней воздушной среды.

Сравнительную оценку воздействия радонового излучения на микроклимат подземных и наземных многоэтажных жилых зданий можно выполнить путем определения и сопоставления упомянутого показателя радоновой безопасности их помещений.

В расчетной модели приняты следующие исходные данные:

- для плотности потока радона Q , мБк/(м²·с), использованы часто наблюдаемые его значения: $Q_1 = 9$ – через горизонтальные ограждающие конструкции наземного и подземного зданий, $Q_2 = 6$ – через вертикальные ограждающие конструкции подземных зданий (разница объясняется тем, что подземные горизонтальные конструкции, в отличие от вертикальных, представляют собой непосредственное препятствие выходу

радона в атмосферу. По этой причине при подсчете площади верхнее покрытие подземного здания условно рассмотрено как вертикальное);

- содержание радонового газа в атмосферном воздухе очень мало.

В расчетной модели использованы величины: плотность радонового излучения $Q_i = 2,5$ и 3 из материала ограждающих конструкций соответственно для наземных и подземных зданий, общепринятые значения постоянной распада $\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ и коэффициента сдвига радиоактивного равновесия $F = 0,5$, нормативное значение кратности воздухообмена для жилых помещений $n = 0,35 \text{ 1/ч}$, или $9,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}$.

Для каждого из показанных на рис. 1 и 2 наземного и подземного зданий приняты суммарные площади горизонтальных ограждающих конструкций $S_1 = 2\,000 \text{ м}^2$ и 7508 м^2 соответственно, а у вертикальных конструкций подземного здания $S_2 = 30\,250 \text{ м}^2$.

В принятых допущениях к расчетной модели для наземного и подземного зданий следующие показатели имеют одинаковые значения:

- сопротивление радонопроницанию наружных ограждающих конструкций;
- суммарная площадь внутренних ограждений и плотность радонового излучения из их материала.

Сравнение показателей ЭРОА этих зданий выполнено по формулам: для подземного здания

$$\text{ЭРОА}_{\text{расч}} = (Q_1 \cdot S_1 + Q_2 \cdot S_2 + \sum_i^n Q_i \cdot S_i) \cdot F / V \cdot (\lambda + n).$$

В наземном здании величиной $Q_2 \cdot S_2$ можно пренебречь ввиду чрезвычайно малой плотности радонового излучения в атмосферном воздухе. Тогда для наземного здания

$$\text{ЭРОА}_{\text{расч}} = (Q_1 \cdot S_1 + \sum_i^n Q_i \cdot S_i) \cdot F / V \cdot (\lambda + n).$$

Коэффициент превышения ЭРОА в подземном здании по сравнению с наземным можно найти из отношения

$$K = \frac{(Q_1 \cdot S_1 + Q_2 \cdot S_2 + \sum_i^n Q_i \cdot S_i) \cdot F / V \cdot (\lambda + n)}{\left(Q_1 \cdot S_1 + \sum_i^n Q_i \cdot S_i \right) \cdot F / V \cdot (\lambda + n)}.$$

Расчет показал, что для принятых условий задачи показатель ЭРОА помещений подземного здания многократно (почти в 14 раз) превышает его значение для наземного здания.

Как известно, выполнение условия $\text{ЭРОА}_{\text{расч}} \leq \text{ЭРОА}_{\text{доп}}$ при проектировании противорадоновой защиты подземного здания можно обеспечить применением комплекса конструктивных мероприятий и с помощью эффективной механической вентиляции:

- использование наружных ограждающих конструкций с большим сопротивлением радонопроницанию, зависящему от вида материала и толщины конструктивных слоев (с включением слоя монолитного армированного тяжелого бетона класса не ниже В20 и при необходимости гидро- и газоизоляционной мембраны). При этом учитывается, что через нижнее наружное ограждение подземного здания будет поступать наибольшая удельная величина плотности потока радонового излучения;

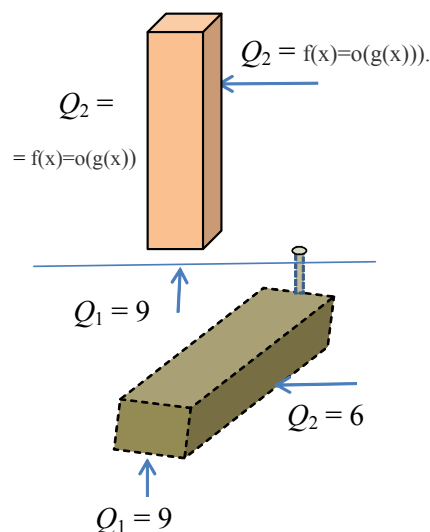


Рис. 1. Плотность потоков радона в подземном и наземном зданиях

– повышение кратности воздухообмена. Для подземного крупногабаритного здания, имеющего многочисленные помещения, это достигается путем использования достаточно мощной и чрезвычайно энергоемкой системы механической вентиляции, позволяющей эффективно удалять вредные газы из внутренней воздушной среды.

Такую систему вентиляции, обеспечивающую активный приток свежего воздуха, особенно целесообразно использовать в крупногабаритном подземном гражданском здании, которое строится в сложных геофизических условиях, отличающихся большой объемной активностью радона и присутствием в глубинах грунта других вредных газов (метан, углекислый газ). В этом отношении представляют интерес высокопроизводительные системы вентиляции такого подземного объекта, как карьер, исследованные в [3, 4], или шахта первой категории по газовому режиму. Система вентиляции в этой шахте снабжена вентилятором производительностью до нескольких сот кубических метров в секунду. С притоком воздуха $300 \text{ м}^3/\text{с}$ он мог бы обеспечить нормативный воздухообмен помещений наземных жилых зданий с общей площадью 360 тыс. м^2 . Данная площадь соответствует трем 60-этажным зданиям, имеющим типичный для небоскребов размер в плане $40 \times 50 \text{ м}$ (рис.2).

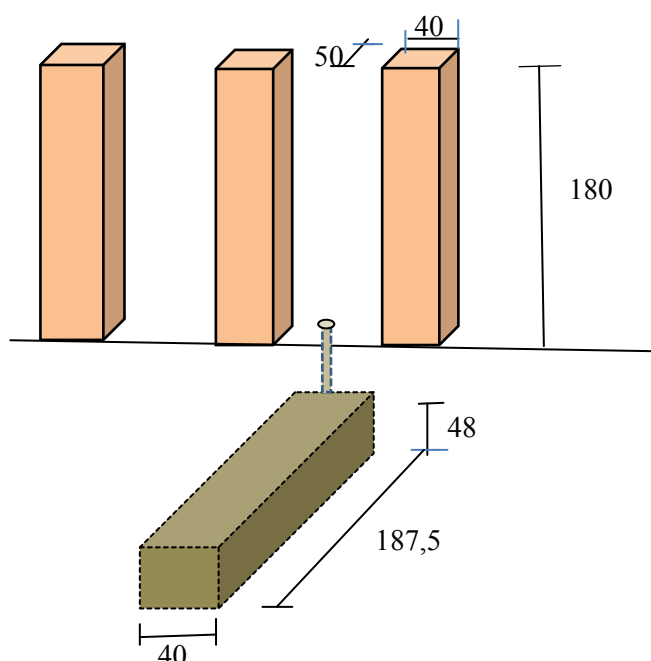


Рис.2. Землескреб в насыщенных радоном грунтах и с системой вентиляции, достаточной для воздухообмена трех небоскребов

При подсчете расходов энергоресурсов на эксплуатацию подземного здания учитывается среднегодовой расход электроэнергии по более затратной (второй) ступени регулирования в кВт·ч. Определяется тепловая нагрузка вентилятора, обеспечивающая подогрев поступающего приточного воздуха, по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{вент}} = 3600 m \cdot c_p \cdot \rho (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}),$$

где m – количество подаваемого в здание воздуха, кг/с; c_p – массовая теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C); ρ – плотность воздуха $\text{кг}/\text{м}^3$.

В расчете теплотерьер подземного здания учитывается величина теплового потока от наружных ограждений в грунт, которая может достигать верхнего предела $5,31 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

При определении расхода энергоресурсов для упомянутого 60-этажного наземного здания ориентируются на базовый удельный годовой расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию $q_{\text{уд}}$ (например, равный $59 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ от общей площади в условиях г. Москвы). Тогда для такого здания приблизительная величина годового расхода составит:

$$Q_{\text{год}} = q_{\text{уд}} \cdot S_{\text{эт}} \cdot n,$$

где $S_{\text{эт}}$ – суммарная площадь этажей, м^2 ; n – количество этажей.

При проектировании противорадоновой защиты этих зданий, помимо конструктивных мероприятий, необходимо использовать высокопроизводительную систему механической вентиляции, что влечет за собой пропорциональное увеличение тепловой нагрузки вентилятора и расходов энергоресурсов на поддержание требуемых параметров микроклимата помещений.

Таким образом, с увеличением размеров подземного обитаемого пространства, и особенно его высоты, снижается эффективность усвоения тепла земляного массива. Несмотря на то что тепловой поток из недр земли на несколько порядков меньше, чем

от наружных ограждающих конструкций в грунт, влияние этого возобновляемого источника энергии на тепловую эффективность крупногабаритных подземных зданий оказывается весьма существенным благодаря отсутствию теплопотерь при инфильтрации холодного воздуха и гораздо меньшему, чем у наземных зданий, перепаду температур по обе стороны наружных ограждений в холодное время года.

Показатель объемной активности радона таких зданий, находящихся под воздействием насыщенных радоном грунтов, может многократно превосходить этот показатель для наземных высотных домов, имеющих такие же размеры.

Список литературы

1. Береговой, А.М. Сверхплотная городская застройка. Энерго- и ресурсосбережение и экология в зданиях / А.М. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №4. – С.223–227.
2. Гулабянц, Л.А. Противорадоновая защита жилых и общественных зданий : монография / Л.А. Гулабянц, А.В. Калайдо ; под ред. И.Л. Шубина. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. – 236 с.
3. Шахрай, С.Г. Новые технические решения по проветриванию глубоких карьеров / С.Г.Шахрай, Г.С.Курчин, А.Г.Сорокин // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240.– С. 654–659.
4. Конорев, М.М. Исследования и перспективы создания систем вентиляции и пылегазоудаления в глубоких карьерах / М.М.Конорев, Г.Ф.Нестеренко // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 93–96.

Reference

1. Beregovoy, A.M. Super-dense urban development. Energy and resource conservation and ecology in buildings / A.M. Beregovoy // Regional architecture and engineering. – 2019. – №.4. – P.223–227.
2. Gulabyants, L.A. Anti-radon protection of residential and public buildings : the monograph / L. A. Gulabyants, A.V. Kalaido ; edited by I. L. Shubin. – Moscow ; Berlin : Direct-Media, 2020. – 236 p.
3. Shakhray, S.G. New technical solutions for ventilation of deep quarries / S.G.Shakhray, G.S.Kurchin, A.G.Sorokin // Notes of the Mining Institute. – 2019. – Vol. 240. – P. 654–659.
4. Konorev, M.M. Research and prospects for the creation of ventilation and dust and gas removal systems in deep quarries / M.M. Konorev, G.F.Nesterenko // Mining Journal. – 2012. – №.1. – P. 93–96.

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

Россия, 430000, г. Саранск, ул. Советская, д. 24,
тел.: 8(951) 055-86-80

Гладышева Маргарита Викторовна,
ст. преподаватель кафедры «Архитектура
и дизайн»

E-mail: nikel_its_me@mail.ru

Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет

Россия, 129337, г. г. Москва,
Ярославское шоссе, 26,
тел.: +7 (495) 656-14-66;

Черушова Наталья Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: cherushova@yandex.ru

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

Russia, 430000, Saransk, 24, Sovetskaya St.,
tel: 8(951) 055-86-80

Gladysheva Margarita Viktorovna,
Senior lecturer of the Department
«Architecture and Design»

E-mail: nikel_its_me@mail.ru

National Research Moscow State Construction
University

Russia, 129337, Moscow,
26, Yaroslavskoe shosse,
tel: +7 (495) 656-14-66

Cherushova Natalia Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: cherushova@yandex.ru

МЕТОД ИМИТАЦИИ В АРХИТЕКТУРЕ ПОСТМОДЕРНИЗМА

М.В. Гладышева, Н.В. Черушова

Архитектура постмодернизма, исходя из своего происхождения как стилистической стратегии, представляет собой сложный феномен, воплощающий специфическую поверхностную философию. Процесс критического анализа синтетической архитектурной среды данного эпохального периода привел к выявлению уникального типа имитационных пространств, которые значительно разнятся от трансгрессивных способов восприятия городской среды. Необходимо подчеркнуть, что архитектурная парадигма постмодернизма не была специфицирована на имитации с целью дестабилизации природных закономерностей, регулирующих внутреннюю логику ее конструкции. Напротив, имитация функционировала как инструмент для расширения творческих горизонтов в сферах дизайна и инженерии, где театрализация является одним из методов, способствующих креативному подходу в формировании вторичной архитектурной среды, оспаривающей традиционные конструктивные «языки».

Ключевые слова: пространство имитаций, постмодернизм, театрализация, фестивальные пространства, метод копирования, синтетическая среда

THE METHOD OF IMITATION IN POSTMODERNIST ARCHITECTURE

M.V. Gladysheva, N.V. Cherushova

The architecture of postmodernism, based on its origin as a stylistic strategy, is a complex phenomenon embodying a specific surface philosophy. The process of critical analysing the synthetic architectural environment of this epochal period has led to the identification of a unique type of imitation spaces, which differ significantly from the transgressive ways of perceiving the urban environment. It should be emphasised that the architectural paradigm of postmodernism hasn't been specified on imitation in order to destabilise the natural regularities governing the internal logic of its design. On the contrary, imitation functioned as a tool for expanding creative horizons in the spheres of design and engineering, where theatricalisation is one of the methods promoting a creative approach in the formation of secondary architectural environments that challenge traditional constructive 'languages'.

Keywords: space of simulation, theatricalisation, postmodernism, festival spaces, copying method, synthetic environment

Архитектура Лос-Анджелеса в контексте постмодернизма характеризуется своеобразными чертами и атрибутами, которые отражают не только статус города как центра американской киноиндустрии, но и новаторские подходы архитекторов, ассоциируемых с этим регионом. Фрэнк Гери, признанный пионером архитектурного современного направления в Голливуде, оказал значительное влияние на формирование архитектурной практики данного периода. Его деятельность, начиная с инсталляции, посвященной выставке Билли аль-Бенгстона в Музее искусств округа Лос-Анджелес в 1968 году, представляет собой важный этап в развитии деконструктивистской архитектуры в рамках постмодернизма. В проектах Гери прослеживается использование таких материалов, как гофрированный металл и необработанная фанера, сопровождающееся созданием открытых конструктивных профилей, что находит отражение не только в его творческом подходе, но и в его работах, включая проект персонального жилья (рис. 1), а также жилые объекты в Санта-Монике и Венецианский дом Шпиллера. Элементы архитектуры, к которым прибегает Гери, такие, как открытые балки, гофрированный металл, необработанная фанера и асимметрично расположенные сетчатые ограждения, становятся ключевыми компонентами постмодернистского архитектурного языка. Влияние данного архитектора на выбор строительных материалов и их дизайнерское использование в реализованных проектах Лос-Анджелеса продемонстрировало значимость и долговременное воздействие на архитектурную среду данного города, что подчеркивает его роль в формировании современной городской архитектуры.



Рис. 1. Дом Фрэнка Гери, Санта-Моника, 1978

Дом, построенный в Топанге архитектором Брайаном Мерфи в 1997 году, представляет собой характерный пример архитектурной практики, демонстрирующий разнообразное влияние Фрэнка Гери и иллюстрирующий концептуальное противоречие между имитацией и театрализацией в контексте постмодернистской архитектуры Лос-Анджелеса. Это сооружение служит материальным выражением стремления преодолеть традиционные строительные нормы, создавая иллюзию динамичной сущности, которая противоречит устоявшимся законам природы, функциональным требованиям и историческому контексту архитектурного проектирования.

Постмодернистская архитектура, как правило, претерпевает критику априорных и метафизических постулатов, что приводит к дестабилизации классических представлений о таких архитектурных типах, как дом, здание или производственное сооружение. В данной практической проекции архетипы и метафизические концепции утрачивают свою прежнюю значимость. Имитация как метод часто приводит к отказу

от общепринятых строительных стандартов и исторических норм, что вызывает деконструкцию значений и языковых аспектов архитектуры.

В частности, дом Штернбергов в Топанге характеризуется наличием промышленного навеса, вызывающего ассоциации со складскими сооружениями или ангарами для техники. Этот навес, поддерживаемый массивными стальными балками, декорирован гофрированной кровлей. Под навесом расположен коттедж с крышей, дополнительно подчеркивающей многослойность и контрастность архитектурного решения. Внешние стены нижнего уровня облицованы гофрированным металлом, тогда как боковые поверхности верхних уровней остаются открытыми, демонстрируя конструктивные деревянные балки и прозрачное оргстекло. В результате данная конструкция создает ощущение промышленного объекта, что подчеркивает характерные для постмодернизма тенденции смешения стилей и форм, а также специфику взаимодействия архитектуры с её культурной средой. Такое восприятие здания усиливается неспрятанной электрической распределительной коробкой, промышленным освещением, открытой проводкой как снаружи, так и внутри дома, с использованием бетонных полов и гаражных ворот, отделяющих жилое пространство комнаты. Вдобавок ко всему, промышленная концепция дополняется поперечной разводкой балок кронштейнов, которые частично закрывают обзор, а световые окна открывают вид только на гофрированный металл крыши. В отличие от коттеджа Ф. Гери, дом Б. Мерфи монохроматичен – кажется менее сложным в пространстве из-за навеса. Сложность жилых объектов Ф. Гери заключается в произвольном и хаотичном сопоставлении форм, которые не поддаются ясному и рациональному взгляду на искусство или строительство [1]. Однако внутреннее пространство дома Б. Мерфи сложно и запутано, что свидетельствует о неприязни постмодернизма к рациональному и структурному.

Фрэнк Гери и ряд архитекторов Тихоокеанского побережья (Брайан Мерфи, Эрик Оуэн Мосс, Фрэнк Исраэль, Ходжеты и Фунги) занимаются проектированием зданий, которые демонстрируют характерную особенность: они имитируют сущности, которыми на самом деле не являются, и скрывают при этом свои истинные функции и формы. Эта черта, наблюдаемая в их архитектурной практике, не является уникальной для постмодернистской архитектуры Лос-Анджелеса. Примером этого подхода служат работы архитектурной группы SITE (рис. 2). Их проекты, предназначенные для крупных универмагов, создают стилизацию под руины, что, в свою очередь, маскирует безопасные и функциональные структуры, служащие основой данных объектов.



Рис. 2. SITE (Скульптура в окружающей среде).
Выставочный зал Notch, компания Best Products, Калифорния, 1977

Однако архитектурные особенности Лос-Анджелеса демонстрируют уникальность, которая не встречается в других регионах. Одним из ярких представителей таких примеров являются открытые профили, характерные для архитектурных объектов

Фрэнка Гери. Эти элементы можно проследить, начиная с его собственного коттеджа в Санта-Монике, возведенного в 1978 году, и заканчивая домом Нортон в Венеции (1984 год) (рис. 3), а также многофункциональным торговым центром Edgemar Development (1988 год) (рис. 4), центральным элементом которого является Художественный музей Санта-Моники. Открытые профили, которые представлены в виде структурных балок и каналов, также находят свое отражение в проекте офиса Скотта Медника, разработанном Эриком Оуэном Моссом на Национальном бульваре 8522. Этот стиль оказал значительное влияние на множество архитекторов региона. Одним из наиболее известных последователей Фрэнка Гери на Тихоокеанском побережье США является Брайан Мерфи, которому принадлежит проект дома Штернбергов в Топанге, завершённый в 1997 году. В рамках данной художественной концепции эффект незавершенности объектов архитектуры усиливает восприятие самого архитектурного произведения, создавая многослойность в интерпретации его содержания и формы. В отличие от архитектуры Мис ван дер Роэ или Филиппа Джонсона 40-х и 50-х годов XX в., открытые балки не стремятся растворить стену, а скорее пытаются укрепить конструкцию, – скрывая брус. Эксклюзивные фрагменты имитируют недостроенные здания или объекты в процессе строительства – создают впечатление, что они небезопасны, непригодны для жилья [4].



Рис. 3. Дом Нортон, Фрэнк Гери, Венеция, 1983



Рис. 4. ТЦ Edgemar Development, Фрэнк Гери, Венеция, 1987

В контексте анализа архитектурных произведений, созданных Брайаном Мерфи по проекту Штернберга, представляется любопытным феномен, связанный с восприятием данного жилого объекта после его заселения. У сторонних наблюдателей могут возникать ассоциации с незавершенными конструкциями, такими, как ангары, склады или фабричные здания, что ставит под сомнение традиционные представления о функциональности и эстетике жилья. Эти наблюдения подчеркивают наличие альтернативных смыслов, вписывающихся в более широкий социальный и культурный контекст, который может носить как родовой, так и классовый характер.

Такой подход к архитектурной интерпретации имеет параллели в других значимых архитектурных проектах. Например, в передней части дома Нортон использование фасадных элементов вызывает ассоциации с конструкциями наблюдательных пунктов спасателей, в то время как задняя стена здания демонстрирует наличие балок, создающих эффект, который отвлекает внимание от традиционных представлений о жилом пространстве. Башня Линдблэйд, спроектированная Эриком Оуэном Моссом в Калвер-Сити, задумывалась как архитектурная реинкарнация средневековых оборонительных конструкций, тем самым внося историческую глубину в современный архитектурный контекст (рис. 5).

Архитектурный ансамбль «Chiat Day Mojo», разработанный Фрэнком Гери в сотрудничестве с Класом Ольденбергом и Кусье ван Брюгеном, является примером стилистического синкретизма (рис. 6). Фасад данного здания включает в себя центральный элемент, выполненный в виде бинокля, разработанного Ольденбергом и Брюгеном, а также контрастные имитации элементов природы в виде бетонных колонн, олицетворяющих лес, и лодки, расположенной по обе стороны фасада. Эти компоненты вновь подчеркивают современную тенденцию архитекторов к экспериментам и переосмыслению традиционных функций и форм в рамках архитектурного языка, что служит основанием для дальнейшего изучения изменяющихся парадигм в архитектуре [5].



Рис. 5. Башня Линдблэйд, Оуэн Мосс, Калвер-Сити, 1989



Рис. 6. Объект «Chiat Day Mojo», Фрэнк Гери, Венеция, 1991

Башня Линдблэйд представляет собой составляющую обширного архитектурного комплекса Paramount-Lindblade Gary Group, который отличается синтезом различных стилистических направлений, включая элементы майя, Ренессанса, а также характеристики современного и классического искусства. Данная правильная интеграция эстетических кодов не только иллюстрирует разнообразие архитектурных традиций, но и способствует критическому анализу функциональных и художественных подходов, присущих этим стилям.

Данными архитектурными образцами ставится под сомнение традиционное понимание классификаций и стилей, что свидетельствует о наличии более сложных взаимосвязей между ними. Использование таких материалов, как гофрированные покрытия для стен и ограждения из соединительных цепей, адаптирует эстетику к требованиям менее обеспеченных слоев населения, тем самым подчеркивая социокультурные аспекты современного городского ландшафта.

Эстетика постмодернизма, проявляющаяся в данном контексте, направлена на размытие жестких границ между стилевыми и функциональными категориями, что приводит к отказу от выразительных средств, характерных для модернистского подхода. Один из ключевых аспектов данной тенденции заключается в создании пространств, открытых для множества интерпретаций, а также в возможности преодоления предвзятых эстетических норм. Однако данная эстетическая парадигма также демонстрирует внутреннюю противоречивость, поскольку одновременно отрицает и скрывает свои собственные аксиомы, тем самым оспаривая пределы традиционной архитектурной практики [6].

В качестве иллюстрации вышеприведенных явлений представляется уместным рассмотреть здание прачечной «Paramount», спроектированное архитектором О. Моссом в 1989 году (рис. 7). Данный архитектурный объект демонстрирует наличие портика, поддерживаемого колоннами, конструктивно изготовленными из канализационных труб, заполненных бетоном. Одна из этих колонн, обладая искаженной формой и динамикой, создаёт иллюзию потенциальной угрозы обрушения, при этом игнорируя основы гравитационных принципов и структурной целостности (рис. 8). Символически эта колонна может быть интерпретирована как олицетворение разрушения неэффективной архитектурной конструкции, что ставит под сомнение актуальность традиционных архитектурных форм.



Рис. 7. Оуэн Мосс, здание прачечной «Paramount», Калвер-Сити, 1989

Изучая архитектурные практики последних десятилетий, особенно следует отметить творческие подходы бюро SITE, которое в 1970-х годах разрабатывало универмаги, начиная с Майами и заканчивая Сакраменто. В своих работах сотрудники SITE использовали стратегию, включающую элементы имитации неуклюжести и искаженности, что становилось выразительным средством для исследования дискурса о пространстве и эпистемологии. Многочисленные проекты данного периода были направлены на создание структур, напоминающих руины или разрушенные обитаемые пространства, при этом скрывающие свою физическую жизнеспособность и прочность. Таким образом, архитектура той эпохи выступала в качестве действенного инструмента для анализа и осмысления взаимосвязей между пространственными конфигурациями и их культурными, социальными и историческими контекстами.

Деконструктивистская архитектура направлена на глубокий анализ и трансформацию устоявшихся архитектурных границ, исследуя внутренние логики своих систем, что находит параллели в теоретическом наследии Жака Деррида. Данная архитектурная практика ставит перед собой задачу оспорить традиционные представления

о структуре и ее значении. В рамках этой концепции авторы отвергают жесткие представления о значимости и классификации в архитектуре, что позволяет им преобразовывать промышленные здания в жилые пространства, а недостроенные сооружения — в завершённые и пригодные для жизни конструкции [2].

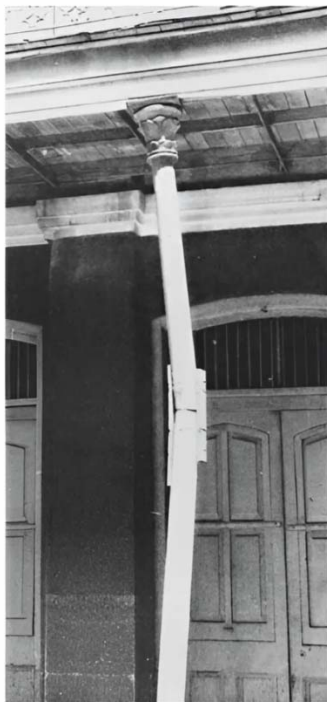


Рис. 8. Архитектурная деталь здания в Новом Орлеане, 1980

Такой подход находит отражение в разнообразных аспектах, включая структурные, социологические и политические элементы. В контексте постмодернистской парадигмы отсутствуют абсолютные ценности, размываются четкие различия между понятиями как правильное и неправильное, табу и священное. Логика деконструкции представляется временной: одно понятие часто переходит в доминирование, прежде чем уступить место другому. В традиционных архитектурных рамках противоречия между жилыми и промышленными функциями, а также между этапами строительства и завершенности объектов воспринимаются как несовместимые как с логической, так и с ценностной точки зрения. В рамках деконструктивистской архитектуры иерархические структуры оказываются динамичными и подверженными постоянным изменениям, могут принимать зачастую противоположные значения, что в конечном счете становится допустимым. Это явление воспринимается как концепция, обозначенная Джонатаном Каллером и основанная на философии деконструкции, представляя собой переосмысление противоположностей причинной схемы.

В конце XIX века Фридрих Ницше обратил внимание на явление метонимии, которое стало основой для формирования деконструктивистского подхода в философии. Ницше выявил, что традиционная связь между причиной и следствием подвергается значительному пересмотру, так как следствие может возникать до своей причины, что в свою очередь инициирует кризис концепции происхождения. Этот принцип находит отражение в постмодернистской архитектуре, где строительный процесс, традиционно воспринимаемый как причина, трансформируется в следствие, создавая парадоксальные ситуации [3].

Архитекторы, работающие в постмодернистском контексте, применяют данный подход для дестабилизации устоявшихся взаимосвязей и деконструирования концептуальных рамок, как в архитектурном, так и в образном отношении. Завершённые архитектурные объекты могут служить инициирующими факторами, которые способствуют своему собственному возникновению, тем самым создавая условия, при которых одни элементы логически ведут к отсутствию или изменению других, в то время как недостроенные сооружения функционируют как результаты этого динамичного процесса [2].

Таким образом, в постмодернистской архитектуре концепция присутствия наполняется многозначными противоположностями. Эта многоплановость иллюстрирует сложности, связанные с удерживанием в сознании двух противоречивых мнений, что также находит отражение в произведении Джорджа Оруэлла «1984», где обсуждается концепция двойного мышления [1]. Стремление к логике в разрушении устоявшихся теорий и отрицании традиционной морали проявляет себя во многих аспектах постмодернистской философии и архитектурной практики, подчеркивая динамику взаимодействия между культурными, социальными и пространственными элементами.

Список литературы

1. Джеймисон, Ф. Постмодернизм, или Культурная логика позднего капитализма / Ф. Джеймисон. – 2-е изд., испр. – Москва : Изд-во ун-та Гайдара, 2019. – 799 с. – ISBN 978-5-3255-557-6.
2. Дженкс, Ч. Язык архитектуры постмодернизма / Ч. Дженкс ; под ред. А.В. Рябушина, В. Л. Хайта. – Москва : Стройиздат, 1985. – 36–51 с. – ИБ № 2571
3. Culler, J. On Deconstruction: Theory and Criticism after Structuralism / J. Culler. – Ithaca : Cornell univ. press, 1982. – 307 p. – ISBN 0-8014-1322-2.
4. Garreau, J. Edge city : life on the new frontier / J. Garreau. – New York : Doubleday, 1991. – 546 p. – ISBN 978-0385424349.
5. Steele, J. Los Angeles Architecture / J. Steele. – London : Phaidon press, 1998. – 232 p. – ISBN 978-0714837567.
6. Серебренникова, Т.А. Принципы формообразования в архитектуре в эпоху информационного взрыва / Т.А. Серебренникова // Региональные архитектурно-художественные школы. – 2011. – № 1. – С. 208–212.

References

1. Jamieson, F. Postmodernism, or the Cultural Logic of Late Capitalism / F. Jamieson. – 2nd ed., revision. – Moscow : Izd-v otd-ta Gaidar, 2019. – 799 p. – ISBN 978-5-3255-557-6.
2. Jenks, C. The language of architecture of postmodernism / C. Jenks ; Edited by A. V. Ryabushin, V. L. Hait. – Moscow : Stroyizdat, 1985. – 36–51 p. – IB NO. 2571
3. Culler, J. On Deconstruction: Theory and Criticism after Structuralism / J. Culler. – Ithaca : Cornell univ. press, 1982. – 307 p. – ISBN 0-8014-1322-2.
4. Garreau, J. Edge city : life on the new frontier / J. Garreau. – New York : Doubleday, 1991. – 546 p. – ISBN 978-0385424349.
5. Steele, J. Los Angeles Architecture / J. Steele. – London : Phaidon press, 1998. – 232 p. – ISBN 978-0714837567.
6. Serebrennikova, T.A. Formation principles in architecture in the era of information explosion / T.A. Serebrennikova // Regional architectural and art schools. – 2011. – № 1. – P. 208–212.

Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы

Россия, 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*

Russia, 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

РЕСТАВРАЦИОННО-РЕКОНСТРУКЦИОННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ

И.Н. Гарькин

Раскрывается концепция реставрационно-реконструкционной трансформации историко-архитектурной среды города. Приведена и обоснована системная классификация методов реставрации и реконструкции с учетом степени вмешательства и уровней преобразования – от сохранения до комплексной трансформации. Проанализированы современные градостроительные, объемные и функциональные подходы, их роль в создании мультикомфортной городской среды (без утраты историко-культурной ценности!). Особое внимание уделено принципам комплексного гармоничного обновления городской среды с учетом экологических, культурных, социальных и экономических аспектов.

Ключевые слова: историко-архитектурное наследие, оздоровление городской среды, реставрация, реконструкция, градостроительство, музеефикация, ревалоризация, интеграция, мультикомфорт, социально-экономическое развитие

RESTORATION AND RECONSTRUCTION TRANSFORMATION OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS OF THE URBAN ENVIRONMENT: MODERN APPROACHES AND CLASSIFICATION

I.N. Garkin

The concept of restoration and reconstruction transformation of the historical and architectural environment of the city is revealed. A system classification of restoration and reconstruction methods is given and substantiated taking into account the degree of intervention and levels of transformation – from preservation to complex transformation. Modern urban planning, volumetric and functional approaches, their role in creating a multi-comfortable urban environment (without losing historical and cultural value) are analyzed. Particular attention is paid to the principles of complex harmonious renewal of the urban environment taking into account environmental, cultural, social and economic aspects.

Keywords: historical and architectural heritage, improvement of the urban environment, restoration, reconstruction, urban development, museumification, revalorization, integration, multicomfort, socio-economic development

Миссия современной урбанистики – сохранять прирастающее поколениями историко-архитектурное наследие и создавать полноценную, комфортную городскую среду. В условиях нарастающего социального и экономического давления урбаниза-

ция не только усложняет задачи сохранения исторических объектов, но и требует поиска новых, более тонких и гибких подходов к интеграции их в ткань современного города. Концепция реставрационно-реконструкционной трансформации (РРТ) основана на целенаправленном управлении всеми уровнями вмешательства – от минимального до самого радикального – с учетом значимости и сохранности объектов, а также потребностей современной жизни [1, 2].

Перед архитекторами, градостроителями, историками и инвесторами стоит задача эффективного сочетания процессов сохранения и развития, интеграции культурных ценностей в новые форматы городского быта. Ниже обсуждаются различные аспекты – от комплексной консервации и музейной адаптации до реабилитации, ревалоризации и даже замены устаревших зданий с сохранением местного архитектурного колорита.

Важнейшим является принцип иерархизации реставрационно-реконструкционных методов в зависимости от степени исторической значимости, физического состояния и перспектив использования каждого объекта или городского фрагмента. Здесь предлагаются системный подход и подробный анализ методологии РРТ. Дается классификация методов с точки зрения градостроительного, объемного, функционального и социально-экономического уровней; раскрывается потенциал комплексного подхода в развитии современной городской среды на базе историко-культурного наследия. Концепция реставрационно-реконструкционной трансформации включает в себя процессы, связанные с различной степенью вмешательства в отдельные существующие здания и городскую архитектурную среду в целом для повышения ценности и целостности и перехода на новый качественный уровень (мультикомфорт с использованием самых разных методов – от *консервации* до *радикальной перестройки*). Предусматривается сохранение объектов культурного наследия с дополнением новых, необходимых для современной качественной жизни (без нарушения исторической ценности). Выбор определенного реставрационного или реконструктивного метода (совокупности методов) принимается в зависимости от степени реставрационного и реконструкционного преобразований (сохранение, усиление, корректировка или изменение) с учетом исходной ситуации, которая представляется выбранным показателем существующего состояния (историко-архитектурная ценность (степень ценности) и целостность (степень разрушения)) [3, 4].

Восстановительные и реконструктивные методы систематизируются в иерархическом порядке с учетом введения нового в исторически сложившейся среде (щадающая восстановительная и активная реконструкция).

Реставрационные и реконструкционные преобразования объектов культурного наследия *на градостроительном уровне* (в планировочной и объемно-пространственной структуре: отдельные кварталы и открытые пространства, ансамбли, исторический центр или сам объект архитектуры) осуществлялись методами сохранения архитектурных объектов существующей городской среды с учетом их ценности и степени разрушения.

На объемном уровне для отдельных зданий в зависимости от их историко-архитектурной ценности, планировочных, архитектурно-конструктивных и инженерных решений использовались сохраняющие, реставрационные, обновляющие и преобразующие методы (*объемные*: могут применяться самостоятельно, исключительно для конкретного здания, а могут входить в состав единого комплекса восстановительно-реконструкционных преобразований (ВРП) для осуществления реставрационных и реконструкционных работ). Для сохранения и усиления первоначальной (исторической) функции применяются *функциональные* методы.

Социально-экономический уровень – объединяющий и результирующий для всех ВРП разных уровней в целях трансформации существующей городской среды. Рост экономической активности и улучшение социального качества жизни человека в конкретном городе достигаются за счет повышения экологической, исторической, архитектурной, градостроительной и утилитарной ценности существующей в нем исторической городской среды. ВРП на социально-экономическом уровне направлены

на создание качественной среды проживания, активное вовлечение жителей в городскую жизнь.

Приведем *систематизацию* существующих методов в иерархическом порядке с учетом их исторической ретроспективы.

Методы консервации. Градостроительство (методы сохранения)

Городская консервация (сохранение) предусматривает поддержание исторической среды архитектурного объекта культурного наследия в том виде, в котором она сохранилась до наших дней, с возможным незначительным, «скрытым» восстановительным вмешательством, действием на обеспечение того, чтобы качество ее состояния соответствовало потребностям современного использования. «Скрытая» реставрационная интервенция – восстановление отдельных нарушенных элементов, фрагментов исторических зданий, их «доработка» согласно имеющимся документам; предусматривает возможность использования современных материалов. «Скрытые» реставрационные мероприятия также предполагают обновление инженерно-технического состояния зданий без изменения их конструктивно-архитектурных решений и городских инженерных сетей, без нарушения гидрологического режима и без динамического воздействия на существующие здания. Данный метод обычно применяется к городской среде, которая очень хорошо сохранила свой исторический облик или является единым ансамблем, для которого введение новых элементов не нужно или нежелательно, в охранной зоне с жесткими требованиями к режиму использования.

Музеефикация архитектурного ансамбля, исторической городской среды предусматривает приведение историко-архитектурного ансамбля или городской среды к «объекту музейной экспозиции с целью максимального сохранения и идентификации исторической, культурной, научной и художественной ценности». Возможны три варианта *музеефикации*: сохранение остатков древних городов на историческом месте, их консервация и превращение в музеи под открытым небом (ввод новых корпусов полностью исключается). Это города-музеи только для туристов. К этому же варианту музейного типа можно отнести раскопки, которые намеренно оставляются открытыми и сохраняются для показа в качестве музейного экспоната. Преимущество заключается в возможности сохранения и демонстрации остатков культурного наследия в месте его исторического существования. Недостатком является то, что эти городские музейные экспонаты, или открытые раскопки, по сути, остаются «мертвыми», если они расположены отдельно и не интегрированы в современную городскую жизнь как культурно-познавательная зона отдыха (часть парка) или общественное пространство (часть площади).

Исторические здания как образцы архитектуры разных периодов, регионов и назначения могут быть собраны из разных уголков страны, перевезены в отдельное место, где устроен город-музей. Преимущество заключается в возможности сохранения и разностороннего знакомства с культурным наследием разных эпох и регионов в условиях, приближенных к реальным. Для того чтобы оживить этот город, организуется перформанс, но это не настоящий «городской перформанс». Он разыгрывается по определенному сценарию приглашенными актерами в определенное время. После окончания спектакля (закрытия музея) этот город пустеет. Недостатком является то, что определенное «место» как бы замирает на определенном этапе своего развития, хотя это может быть самый красивый и впечатляющий этап. И именно за этими впечатлениями в этот город едут многочисленные туристы. Преимущество в том, что город живой и является носителем исторической и социокультурной памяти, «духа места». Этот вариант *музеефикации* можно условно определить как разновидность *городской консервации* [5].

Объемные (сохраняющие) методы. При консервации исторической городской среды может осуществляться *консервация* отдельных существующих объектов культурного наследия и памятников. Метод реставрации предполагает сохранение аутентичности и защиту от дальнейшего разрушения объектов культурного наследия, памятников, оставление их в том виде, в котором они сохранились до наших дней, без

проведения каких-либо работ по их реконструкции. *Консервация* архитектурного объекта культурного наследия целесообразна, если на момент реализации ВРП в существующей исторической среде:

- на его территории проводятся археологические раскопки;
- нет достаточных источниковых данных об этом памятнике для его научно обоснованного воспроизведения (исторические рисунки, иконографии);
- «сохранившийся» объект культурного наследия может активно использоваться и не окажет негативного влияния на целостность исторической городской среды. Он должен стать, например, отдельно стоящим музейным экспонатом в историческом центре или элементом его благоустройства. Необходимо не допустить, чтобы сохранившийся памятник и его территория находились в неухоженном, запущенном состоянии, так как это постепенно приведет к их деградации и разрушению существующей исторической городской среды.

Реставрация архитектурного объекта культурного наследия – это улучшение его состояния путем усиления и нейтрализации негативных биохимических процессов в его конструкциях.

Ремонт – это улучшение технического состояния и поддержание объектов культурного наследия, являющихся предметом охраны, в надлежащем эксплуатационном состоянии без изменения.

«Законсервированный» памятник может быть музеефицирован. *Музеефикация* объектов культурного наследия, памятников заключается в приведении их в состояние, пригодное для экскурсионного посещения и культурно-просветительского использования, с помощью комплекса научно обоснованных мероприятий. Памятник может стать музеем и объектом музейной экспозиции одновременно. Наибольшее количество музеефицированных объектов составляют объекты культурного наследия архитектуры, но все чаще музеефикация касается археологических и природных памятников.

Функциональные методы консервации. Интерпретация (репрезентация) – это представление памятника, раскрытие его содержания, разъяснение смысла и сохранение памяти путем создания необходимых условий для его осмотра с минимальным вмешательством в его сохранившийся облик. Памятник используется в качестве музейного экспоната с раскрытием его первоначального функционального назначения. Лучшему представлению архитектурного объекта культурного наследия могут способствовать организованные постоянные экспозиции и выставки.

Функциональное сохранение первоначальной (исторической) функции – обеспечение активного первоначального использования здания (открытого пространства) с поддержанием его элементов в надлежащем состоянии [6].

Модификация первоначальной (исторической) функции – это придание функции новых признаков, изменяющих ее смысл и качество. Модификация первоначальной (исторической) функции здания или открытого пространства выполняется в соответствии с новыми потребностями для ее сохранения как репрезентативного компонента.

Адаптация – обеспечение современного использования объекта культурного наследия без изменения присущих ему свойств, являющегося предметом охраны, включая восстановление элементов, представляющих историко-культурную ценность.

Восстановительные методы. Градостроительство (основные методы)

Реставрация – это приведение в первоначальное или прежнее состояние после повреждения или разрушения, возвращение утраченного исторического облика городской среды (ансамбля) с воссозданием всех его заброшенных и разрушенных элементов. Реставрация актуальна и для разрушенной в результате определенных трагических обстоятельств исторической среды, которая представляла собой архитектурный ансамбль, сформированный временем и работой различных архитекторов. Для грамотного восстановления разрушенных элементов такого ансамбля необходима подробная база исходных данных (сохранившиеся исторические или габаритные чертежи, иконографии, фотографии). Реставрация обычно выполняется на конкретный

срок (начальный или до повреждения). При этом допускается необходимое «скрытое» введение новых элементов. Наиболее важный период определяется исходя из времени наибольшего расцвета ансамбля. «Скрытое» введение новых элементов означает их исполнение в стиле, к которому относятся отреставрированные здания ансамбля. Этот метод, как правило, применяется к городской среде. Для сохранения целостности ансамбля нежелательно использование современных форм для новых зданий. Применение данного метода также будет целесообразно в районе территории памятника, в охранных зонах памятников и в комплексной охранной зоне с высокой степенью сохранности.

Реабилитация (исторической городской среды) – метод реставрации городских территорий, имеющих архитектурные и градостроительные объекты культурного наследия, которые в настоящее время не используются по прямому назначению, – выполняется для восстановления утраченных исторических функций и традиционных городских процессов. Неорганизованное пространство вокруг этих заброшенных объектов культурного наследия создает ощущение пустоты. При этом снижаются качество визуального восприятия памятников, их значимость и постэмоциональное воздействие. Реабилитация актуальна, например, для заброшенных храмовых комплексов, рыночных площадей, исторических мест, территорий, расположенных в пределах зоны безопасности ансамбля. Реабилитация используется для реализации ВРП как на градостроительном, так и на объемном уровне [7].

Ревалоризация направлена на повышение архитектурно-художественной ценности исторической городской среды с реконструкцией или маркировкой утраченных знаковых элементов, с введением новых компенсационных элементов [8].

Ревалоризация способствует:

- 1) реконструкции или обозначению мест исторического расположения разрушенных знаковых зданий, градостроительных сооружений, их элементов с помощью приемов озеленения в случае невозможности или нецелесообразности их восстановления;
- 2) повышению исторической, архитектурной, художественной и социально-экономической ценности существующих архитектурных памятников (на объемном и функциональном уровнях) за счет их *целостной реставрации* и *адаптации* к новым функциям с сохранением и восстановлением их архитектурно-планировочной и конструктивной системы;
- 3) повышению архитектурной, художественной и утилитарной ценности исторически малоценных зданий за счет улучшения качества их отделки и за счет *функционального дополнения* и *адаптации* (на функциональном уровне);
- 4) замене утраченных или устаревших исторически малоценных зданий новыми, современными с соблюдением исторической модульности, этажности и местного архитектурного колорита;
- 5) компенсационному современному строительству для создания новых доминант и акцентов взамен утраченных исторических, а также для избавления от нежелательных пробелов в непрерывных обычных исторических зданиях, что необходимо для восстановления общей объемной композиции исторической городской среды.

Выводы. Произведена систематизация методов реставрационно-реконструкционной трансформации на принципах диалога между прошлым и настоящим с возможностью достижения баланса между сохранением историко-архитектурной достоверности и обновлением городской среды для комфортной современной жизни.

Предложенная классификация РРТ допускает гибкий выбор индивидуальной стратегии для каждого объекта, блока или целого исторического центра с учетом степени ценности и разрушения, а также особенностей их интеграции в социально-экономические процессы.

Такой подход не только обеспечивает сохранение памяти и идентичности, но и формирует долгосрочный потенциал для устойчивого развития городов, их экономической жизнеспособности и привлекательности для жителей и инвесторов. Крайне важно, чтобы реставрационные и реконструктивные вмешательства сочетались

с программами социальной активности, экономического стимулирования и экологизации, становясь основой для будущего культурного и качественного роста городских территорий России.

Список литературы

1. Гарькин, И.Н. Историко-архитектурная ценность объектов культурного наследия: методика оценки, пофакторный и историко-генетический анализ / И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 1 (62). – С. 192–199.
2. Гарькин, И.Н. Методика детерминации степени деструкции объектов культурного наследия: системно-структурный анализ / И.Н. Гарькин, В.В. Галишникова // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63). – С. 193–199.
3. Крогиус, В.Р. Исторические города России как феномен ее культурного наследия / В.Р. Крогиус. – Москва : Прогресс-Традиция, 2009. – 312 с.
4. Синявина, Н.В. Городское пространство / город как объект исследования: историография вопроса / Н.В. Синявина // Вестник культурологии. – № 3 (98). – 2021. – С. 94–105.
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. Батаев, Д.К.С. Концепция сохранения объектов культурного наследия Северо-Кавказского федерального округа / Д.К.С. Батаев, С.Г. Шеина, Л.С. Сабитов, К.Х. Ибрагимов, П.Д. Батаева, Я.Д. Батаева. – Махачкала, 2025.
8. Шеина, С.Г. Системное моделирование организационно-технологической надежности ремонта, реставрации и реконструкции объектов культурного наследия / С.Г. Шеина, Л.С. Сабитов, Д.К.С. Батаев, П.Д. Батаева, Я.Д. Батаева // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 1 (121). – С. 516–526.

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. – No. 3 (98). – 2021. – P. 94–105.
3. Garkin, I.N. Historical and architectural value of cultural heritage sites: assessment methods, factorial and historical-genetic analysis / I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 1 (62). – P. 192–199.
4. Garkin, I.N. Methodology for determining the degree of destruction of cultural heritage sites: systemic and structural analysis / I.N. Garkin, V.V. Galishnikova // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 2 (63). – P. 193–199.
5. Esaulov, G.V. Sustainable architecture – from principles to development strategy / G.V. Esaulov / G.V. Esaulov // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2014. – No. 6. – P. 9–25.
6. Budylna, E.A. Systems analysis as a methodology for solving problems / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 2 (55). – P. 14–20.
7. Bataev, D.K.S. Concept of preservation of cultural heritage sites of the North Caucasian Federal District / D.K.S. Bataev, S.G. Sheina, L.S. Sabitov, K.Kh. Ibragimov, P.D. Bataeva, Ya.D. Bataeva. –Makhachkala, 2025.
8. Sheina, S.G. System modeling of organizational and technological reliability of repair, restoration and reconstruction of cultural heritage sites / S.G. Sheina, L.S. Sabitov, D.K.S. Bataev, P.D. Bataeva, Ya.D. Bataeva // Engineering Bulletin of the Don. – 2025. – No. 1 (121). – P. 516–526.

