НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Адрес издателя, редакции и типографии:
440028, г.Пенза, ул.Германа Титова, 28, ПГУАС
Тел/факс 8412 929501
E-mail: regas@pguas.ru
fmatem@pguas.ru
www.rais.pguas.ru

Главная редакция:
А.М. Данилов (главный редактор)
Е.В. Королев (заместитель главного редактора)
И.А. Гарькина (ответственный секретарь)

Редакторы: М.А. Сухова
Н.Ю. Шалимова

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 использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации.
Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора.

Подписано к печати 23.09.2024.
Формат 60x84 1/8.
Уч.-изд.л. 27,75. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 142.

Дата выхода в свет 30.09.2024.
Отпечатано в издательстве ПГУАС
Цена 1200 руб.

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

3(60)/2024

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ 5

Королев Е.В., Гришина А.Н., Ли Сяодун
ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ПРОТЕКАНИЯ ЩЕЛОЧНОЙ КОРРОЗИИ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЁМНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В МАТЕРИАЛЕ 5

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И ЗАКОНЫ РАЗВИТИЯ: СИНТЕЗ КОМПОЗИТОВ 19

Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н.
КОМПОЗИЦИОННОЕ ВЯЖУЩЕЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В ЗАВОДСКИХ УСЛОВИЯХ 26

Очкина Н.А., Шмарова Т.С., Очкин И.А.
РАДИАЦИОННЫЙ РАЗОГРЕВ И ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ВЫСОКОПЛОТНЫХ КОМПОЗИТОВ ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ 32

Зайцева М.В., Логанина В.И., Куимова Е.И.
ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ С УЧЕТОМ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА 40

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 48

Айзатуллин М.М., Зарипов М.М., Сабитов Л.С., Гарькина И.А.
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОРТАЛЬНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ ОПОР 48

Макридин Н.И., Максимова И.Н.
ПАРАМЕТРЫ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ 57

Глухов В.С., Хрянина О.В., Янгуразов Ю.Р., Волков К.О.
НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СВАЙ ПРИ ПОГРУЖЕНИИ ВДАВЛИВАНИЕМ 66

© Авторы публикаций, 2024
© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2024
© ПГУАС, 2024

Шеин А.И., Зайцев М.Б.
ЧАСТОТНО-ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗ СЕРИИ ОДНОТИПНЫХ ЗДАНИЙ РАЗНОЙ ЭТАЖНОСТИ 74

Шеин А.И., Чуманов А.В., Зайцев М.Б.
ТРИ НОВЫХ СПОСОБА ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ 81

Ивашенко Ю.А., Шабиев С.Г.
ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА..... 90

Ласьков Н.Н., Р. Раззак А.В., Зернов В.В., Мирсаяпов И. Т.
МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛОТИНАХ 100

Мартышкин Д.О.
НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ВКЛЕЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБ..... 108

Тарасеева Н.И., Раткин В.В., Цирулев И.В.
НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ..... 118

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 128

Гришин Б.М., Бикунова М.В., Салмин С.М., Янюшкин Д.А.
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ ПРИМЕСЕЙ ВОДЫ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ДИСПЕРСНОСТИ 128

Андреев С.Ю., Лебединский К.В., Князев В.А., Глебова Т.А.
ВИХРЕВОЙ САТУРАТОР..... 134

Кузина В.В., Кошев А.Н.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ..... 142

Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Орлова Н.А.
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА С ВЫТЯЖНЫМ ВОЗДУХОВОДОМ ВНУТРИ ЗОНТА 148

Колосов М.В., Липовка Ю.Л.
АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА 163

АРХИТЕКТУРА..... 175

Бенаи Х.А., Радионов Т.В., Сабитов Л.С., Викторова О.Л.
АРХИТЕКТУРА НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ.....175

Береговой А.М.
ОБОГРЕВ ПОДЗЕМНЫХ И ЗАГЛУБЛЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ТЕПЛОМ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЗЕМЛИ 184

Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Рахимов Ф.А.
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ: ВОЗДУШНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ В ПОМЕЩЕНИИ.....189

Селютина Л.Ф., Бочарова Е.С.
БРЕВЕНЧАТЫЙ ЖИЛОЙ ДОМ В ПЕТРОЗАВОДСКЕ – ОБЪЕКТ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ 195

Лобов И.М., Ступина А.Э., Гарькин И.Н., Ахтямова Л.Ш.
АРХИТЕКТУРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ НЕДЕЙСТВУЮЩИХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ (НА ПРИМЕРЕ ДОНБАССА) 207

Гречишкин А.В., Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОГО ШУМА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В ПОМЕЩЕНИИ.....214

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS 5

Korolev E.V., Grishina A.N., Li Xiaodong
ASSESSMENT OF ALKALINE CORROSION CONDITIONS. STUDY OF VOLUMETRIC DISTRIBUTION OF WATER IN THE MATERIAL 5

Budylina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.
SYSTEM APPROACH AND LAWS OF DEVELOPMENT: SYNTHESIS OF COMPOSITES 19

Romanenko I.I., Fadin A.I., Petrovnina I.N.
COMPOSITE BINDER FOR PRODUCTION OF REINFORCED CONCRETE PRODUCTS IN FACTORY CONDITIONS 26

Ochkina N.A., Shmarova T.S., Ochkin I.A.
RADIATION HEATING AND THERMAL STABILITY OF HIGH-DENSITY COMPOSITES FOR SPECIAL PURPOSES .. 32

Zaitseva M.V., Loganina V.I., Kuimova E.I.
ASSESSMENT OF PRODUCT QUALITY CONSIDERING THE STATE OF THE TECHNOLOGICAL PRODUCTION PROCESS 40

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS 48

Ayzatullin M.M., Zaripov M.M., Sabitov L.S., Garkina I.A.
STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF PORTAL LATTICE SUPPORTS CONSTRUCTION 48

Makridin N.I., Maksimova I.N.
PARAMETERS OF CRACK RESISTANCE OF CEMENT COMPOSITES 57

Glukhov V.S., Khryanina O.V., Yangurazov Yu.R., Volkov K.O.
BEARING CAPACITY OF PILES IMMERSED BY INDENTATION 66

Shein A.I., Zaitsev M.B.
FREQUENCY-VECTOR ANALYSIS OF A SERIES OF SIMILAR BUILDINGS OF DIFFERENT STOREYS 74

Shein A.I., Chumanov A.V., Zaitsev M.B.
THREE NEW WAYS OF DAMPING VIBRATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES 81

Ivashenko Yu.A., Shabiev S.G.
INNOVATIVE WAYS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF MULTI-STOREY BUILDINGS MADE OF REINFORCED CONCRETE 90

Laskov N.N., Razzak R.A.V., Sernow V.V., Mirsayapov I.T.
MECHANISM OF CRACKS FORMATION AND DEVELOPMENT IN REINFORCED CONCRETE DAMS 100

Martyshkin D.O.
BEARING CAPACITY OF WOODEN STRUCTURES CONNECTIONS WITH VARIOUS PARAMETERS OF GLUED FIBERGLASS WASHERS 108

Taraseeva N.I., Ratkin V.V., Cirulev I.V.
SCIENTIFIC, THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF THE AGGRESSIVE ENVIRONMENTS IMPACT ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF TRANSPORT FACILITIES 118

ENGINEERING SYSTEMS 128

Grishin B.M., Bikunova M.V., Salmin S.M., Yanyushkin D.A.
THEORETICAL STUDIES OF COAGULATION PROCESS OF WATER IMPURITIES WITH DIFFERENT DISPERSITY 128

Andreev S.Yu., Lebedinskiy K.V., Knyazev V.A., Glebova T.A.
A VORTEX SATURATOR 134

Kuzina V.V., Koshev A.N.
MATHEMATICAL MODELING OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES IN POROUS MEDIA 142

Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Orlova N.A.
THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF A TECHNICAL DEVICE WITH AN EXHAUST AIR DUCT INSIDE THE DEVICE 148

Kolosov M.V., Lipovka Y.L.
ANALYSIS OF HOT WATER SUPPLY OPERATION MODES USING THE DEVELOPED MONITORING SYSTEM 163

ARCHITECTURE.....175

Benai Kh.A., Radionov T.V., Sabitov L.S., Viktorova O.L.
ARCHITECTURE OF SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL COMPLEXES UNDER RECONSTRUCTION..... 175

Beregovoy A.M.
HEATING OF UNDERGROUND AND BURIED ROOMS WITH THE HEAT OF THE UPPER LAYER OF THE EARTH 184

Derina M.A., Petryanina L.N., Rakhimov F.A.
RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES IN THE RECONSTRUCTION OF RESIDENTIAL BUILDINGS: INDOOR AIR CIRCULATION 189

Selutina L.F., Bocharova E.S.
LOG RESIDENTIAL BUILDING IN PETROZAVODSK – AN OBJECT OF CULTURAL HERITAGE IN PETROZAVODSK: HISTORY AND METHODOLOGY OF THE STUDY 195

Lobov I.M., Stupina A.E., Garkin I.N., Akhtyamova L.Sh.
ARCHITECTURAL FORMATION OF CONSTRUCTION PRODUCTION COMPLEXES BASED ON NON-OPERATING COAL MINES (BASED ON THE EXAMPLE OF DONBASS).....207

Grechishkin A.V., Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V.
EXPERIMENTAL EVALUATION OF A COMBINED METHOD FOR CALCULATING PULSE NOISE PROPAGATING IN A ROOM.....214

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691 : 620.193.4 DOI 10.54734/20722958_2024_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 работе, профессор кафедры «Технология строительных материалов и метрологии»
E-mail: prorector_nr@spbgasu.ru

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

Ли Сяодун,
аспирант кафедры «Технология строительных материалов и метрологии»
E-mail: bntu@foxmail.com

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, Professor 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

Li Xiaodong,
Postgraduate student of the Department «Technology of Construction Materials and Metrology»
E-mail: bntu@foxmail.com

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ПРОТЕКАНИЯ ЩЕЛОЧНОЙ КОРРОЗИИ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЁМНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В МАТЕРИАЛЕ

Е.В. Королев, А.Н. Гришина, Ли Сяодун

Щелочная коррозия – распространённый вид разрушения бетона в эксплуатационный период. Основной причиной этого вида коррозии является самоподдерживаемая щелоче-силикатная реакция, скорость которой определяется концентрацией активных компонентов. Вода необходима для протекания щелоче-силикатной реакции. При этом она же часто является одним из постоянно действующих эксплуатационных факторов. Представлены результаты моделирования распределения воды в теле бетона, обладающего пористо-капиллярной структурой. Показаны особенности такой пористо-капиллярной структуры и выявлено влияние геометрических характеристик капилляров на характеристики капиллярной пористости. Исследовано влияние физических свойств жидкости и поверхностных явлений на величину и кинетику массопоглощения. Проведён анализ фрактальной размерности фронта пропитки образца в зависимости от характеристик капиллярной пористости материала. Показано, что с ростом поликапиллярности фрактальная размерность фронта пропитки также увеличивается.

Ключевые слова: щелочная коррозия, щелоче-силикатная реакция, объёмное распределение воды, капиллярно-пористая структура, капиллярный потенциал

ASSESSMENT OF ALKALINE CORROSION CONDITIONS. STUDY OF VOLUMETRIC DISTRIBUTION OF WATER IN THE MATERIAL

E.V. Korolev, A.N. Grishina, Li Xiaodong

Alkali corrosion is a common type of concrete destruction during the operational period. The main cause of this type of corrosion is a self-sustaining alkali-silicate reaction, the rate of which is determined by the concentration of the active components. Water is necessary for the alkali-silicate reaction to take place. At the same time, it is often one of constantly operating operational factors. The paper presents the results of modeling the distribution of water in the body of concrete with a porous-capillary structure. The features of such a porous-capillary structure are shown and the influence of the geometric characteristics of capillaries on the characteristics of capillary porosity is revealed. The influence of the physical properties of the liquid and surface phenomena on the magnitude and kinetics of mass absorption has been studied. The fractal dimension of the sample impregnation front has been analyzed depending on the characteristics of the capillary porosity of the material. It is shown that with polycapillarity increasing, the fractal dimension of the impregnation front also increases.

Keywords: alkaline corrosion, alkali-silicate reaction, volumetric distribution of water, capillary-porous structure, capillary potential

Введение. Щелочная коррозия является одним из распространённых и сложных процессов разрушения бетонов на портландцементе. Её сложность в основном обусловлена маскировкой и влиянием на другие процессы разрушения конструкции в эксплуатационный период. Библиография химических и физических особенностей щелочной коррозии весьма обширна. Достаточно представить некоторые обобщения, систематизирующие накопленные экспериментальные и теоретические знания в этой предметной области [1–7].

Основой щелочной коррозии является щелоче-силикатная реакция, приводящая к образованию продукта (щелочного гидросиликатного геля), способного при последующем химическом превращении в гидросиликаты кальция и наличии физических ограничений порового пространства вызывать внутренние напряжения, которые способствуют образованию и развитию трещин [5]. Особенностью щелоче-силикатной реакции в случае щелочной коррозии является её самоподдерживающий характер, который состоит в обеспечении наличия в достаточном количестве всех компонентов реакции; образующиеся из щелочного гидросиликатного геля гидросиликаты кальция способствуют созданию физических барьеров, заполняющих поровое пространство, что и является одним из условий для возникновения внутренних напряжений вследствие расширения геля при поглощении воды.

Изучению порового пространства цементных бетонов и его значения для эксплуатационных свойств конструкций посвящено значительное количество исследований. Достаточно выделить следующие фундаментальные работы [6–24]. Эта область является предметом исследований и в других сферах деятельности [25–29]. Проникновение жидкости в капиллярно-поровое пространство материала – процесс, для описания которого предложено значительное количество моделей, учитывающих различные физические условия и свойства веществ (размер капилляров, поверхностное натяжение жидкости, краевой угол смачивания материала, объём порового пространства, наличие внешнего давления и т.д.). Сложность строения пористо-капиллярной структуры предопределяет возможность оценивать процесс поглощения жидкости как фрактальный [30–32], в том числе фронт поглощаемой жидкости оценивается величиной фрактальной размерности [33, 34].

Основной задачей нашего исследования является определение распределения жидкости (воды) в объёме материала как одного из условий, необходимых для протекания щелоче-силикатной реакции, а также определение влияния основных характеристик контактирующих сред (образца материала и жидкости) на величину и скорость массопоглощения.

Методика проведения исследования. В данной работе пористо-капиллярное тело представлено в виде ансамблей капилляров, направленных от внешних граней к цент-

ру образца. Такое рассмотрение порового пространства материала и анализ объёмных эффектов поглощения жидкости были представлены в [35]. Развивая идеи, заложенные в указанной работе, представим расчётные зависимости для определения основных характеристик порового пространства капиллярного тела (образца материала), а также основные свойства веществ и параметры для моделирования.

Образец материала кубической формы с длиной грани a_0 разбивается на слои постоянной толщины l_{sl}. Объём каждого слоя будет уменьшаться от внешней грани к центру образца. При этом будет выполняться равенство

$$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \left(a_0 - (i-1)l_{sl}\right)^3 - \left(a_0 - il_{sl}\right)^3 = a_0^3,$$

где $N_{sl} = a_0 / (2l_{sl})$ – количество слоёв.

В каждом слое капилляры представляются в виде полых цилиндров с диаметром d_k и длиной l_{sl}. Количество капилляров на поверхности каждого слоя определяется плотностью их упаковки η_k, а также соотношением h_0 / d_k (рис. 1, а):

$$N_{k,i} = \frac{4\eta_k S_i}{\pi\left(d_k + 2h_0\right)^2},$$

где S_i – общая площадь поверхности слоя; h_0 – толщина прослойки плотного вещества материала.

а б

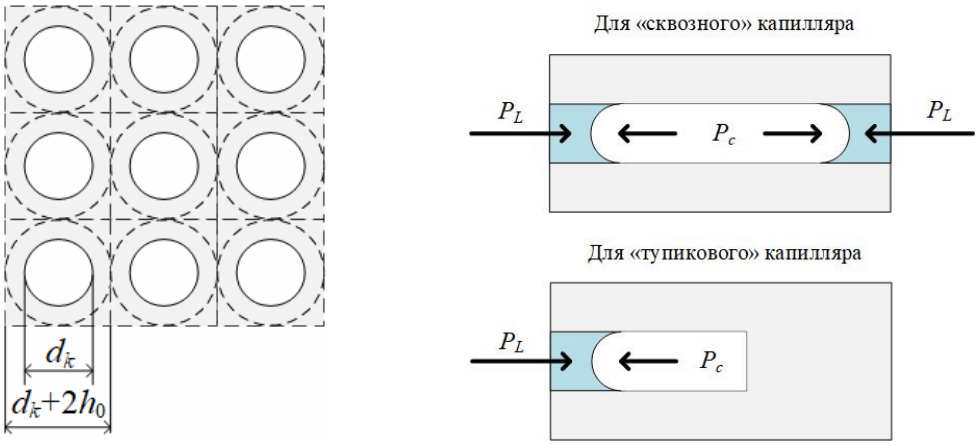


Рис. 1. Модель порового пространства материала и действующих сил в капилляре (обозначения величин в тексте):
а – решетчатое приближение расположения капилляров на поверхности слоя;
б – физическая схема действующих сил в капилляре

Доля площади поверхности слоя, занятая капиллярами, при принятых η_k, d_k и h_0 / d_k будет равна постоянной величине

$$\delta_{s,k} = \frac{\eta_k d_k^2}{\left(d_k + 2h_0\right)^2} = \text{const}.$$

Капиллярная пористость материала с учётом представленных формул будет равна

$$P_{km} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \frac{\eta_k \left(a_0 - (i-1)l_{sl}\right)^2 d_k^2 l_{sl}}{\left(d_k + 2h_0\right)^2 \left[\left(a_0 - (i-1)l_{sl}\right)^3 - \left(a_0 - il_{sl}\right)^3\right]}.$$

Продолжительность заполнения капиллярного пространства образца рассчитывается согласно закону Пуазейля и суммируется по каждому слою:

$$t_w = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \frac{32\mu l_{sl}^2}{d_k^2 \Delta P_i},$$

где μ – вязкость жидкости; ΔP_i – перепад давления на концах капилляра.

Для рассматриваемой задачи – свободного поглощения жидкости (без приложения дополнительного давления) – перепад давления будет определяться давлением Лапласа P_L и давлением сопротивления слоёв материала P_c; влияние силы тяжести жидкости в капилляре и угол его наклона для упрощения исследования исключены. Предполагается, что P_c увеличивается от внешних граней к центру образца по формуле

$$P_c = P_L\left(1 - exp\left(-bH^n\right)\right),$$

где $H = \sum_{i=1}^{i} l_{sl,i}$ – глубина проникновения жидкости в материал для рассматриваемого i-го слоя; b и n – параметры, определяющие интенсивность поглощения жидкости материалом.

Давление Лапласа с учётом смачиваемости твёрдого вещества материала жидкостью равно

$$P_L = \frac{\sigma}{d_k}\cos(\theta),$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости; θ – краевой угол смачивания жидкостью твёрдого вещества материала.

Отсюда перепад давления ΔP_i представим в виде

$$\Delta P_i = \omega_p \frac{\sigma}{d_k} exp\left(-bH^n\right)\cos(\theta),$$

где ω_p – коэффициент корректировки перепада давления.

Коэффициент корректировки возникает при рассмотрении варианта задачи, предполагающего наличие «тупикового» капилляра или «сквозного» капилляра (элемента системы «дерева» капилляров), для которого давление Лапласа действует с двух его концов. В этом случае под действием давления происходит сжатие газовой среды до достижения равновесия. Это равновесие в соответствии с законом Менделеева – Клапейрона возникает на глубинах, равных

$$H_{\max} = \frac{a_0}{2}\left(\frac{\sigma\cos(\theta)}{d_k P_0 + \sigma\cos(\theta)}\right),$$

где P_0 – атмосферное давление.

Коэффициент корректировки ω_p вычисляется как соотношение $H_{\max}$ для исследуемого диаметра капилляра к $H_{\max}$ для капилляра минимального диаметра:

$$\omega_p = H_{\max}(d_k) / H_{\max}(d_{k,\min}).$$

Поглощение жидкости по массе с учётом представленных формул будет равно

$$W_m = \frac{\pi \rho_l d_k^2 l_{sl}}{4\rho_s \left(1-P_{km}\right) a_0^3} \sum_{i=1}^{N_{sl}} N_{k,i},$$

где ρ_l – плотность жидкости; ρ_s – плотность абсолютно плотного твёрдого вещества материала.

Для проведения моделирования использованы следующие параметры:

1) геометрические характеристики: размер образца – 0,02 м; соотношение $l_{sl} / d_k = 4$; диаметры капилляров d_k: 0,1; 1,0 и 10,0 мкм; плотность упаковки капилляров η_k: 0,34; 0,52 и 0,74;

2) общие физические свойства: атмосферное давление $P_0 = 101325$ Па; краевой угол смачивания: $0° \le \theta < 90°$;

3) свойства жидкости и твёрдого вещества образца: наименование – вода; плотность $\rho_l = 1000$ кг/м^3; поверхностное натяжение $\sigma = 0,073$ Н/м; вязкость $\mu = 0,00101$ Па·с; плотность $\rho_s = 2400$ кг/м^3.

Результаты и обсуждение

1. Характеристики порового пространства капиллярного тела. Очевидно, представление порового пространства в виде ансамбля капилляров с характерными геометрическими размерами существенно упрощает фактическое строение пористого пространства материала и способно описать только один вид пористости – его открытую пористость. Однако такой подход позволяет произвести оценку вклада геометрических характеристик капилляров, объёма порового пространства в кинетику поглощения жидкости, а также оценить характерные особенности строения пористо-капиллярного пространства образца.

Базовыми параметрами, определяющими объём порового пространства (капиллярную пористость), являются: соотношение h_0 / d_k и плотность упаковки капилляров на поверхности слоя η_k. Очевидно, что увеличение η_k и уменьшение h_0 / d_k будут приводить к повышению капиллярной пористости (рис. 2).

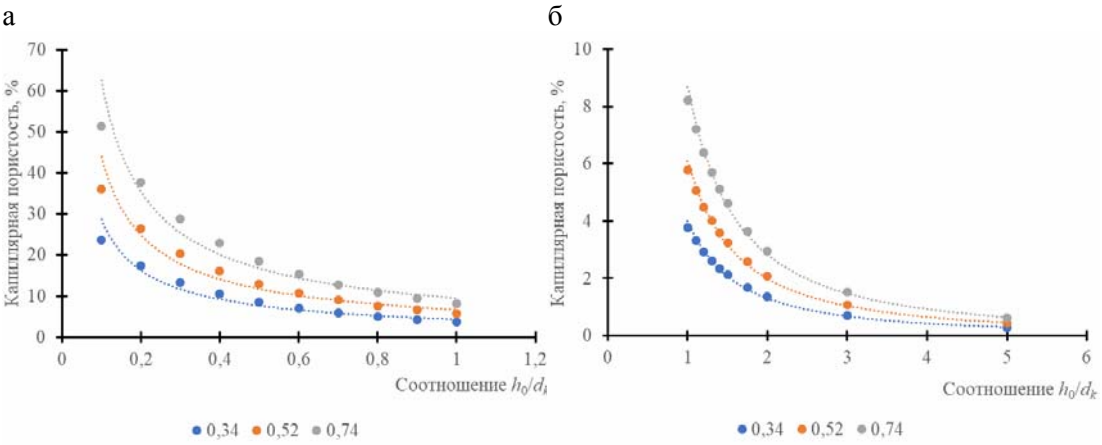


Рис. 2. Типичные графики зависимости $P_{km} = f\left(h_0 / d_k\right)$:
а – для $h_0 / d_k \le 1$; б – для $h_0 / d_k \ge 1$ (данные для $d_k = 0,1$ мкм)

Данные, представленные на рис. 2, хорошо описываются степенной функцией вида

$$\left[P_{km}\right]_{d_k,\eta_k} = A\left(\frac{h_0}{d_k}\right)^{-B},$$

где A, B – коэффициенты (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты зависимости $P_{km} = f\left(h_0 / d_k\right)$

Соотношение h_0 / d_k	Плотность упаковки η_k	Коэффициенты	
		A	B
$h_0 / d_k \le 1$	0,34	4,37/4,39/5,51 (*)	0,82/0,82/0,82
	0,52	6,69/6,71/6,89	0,82/0,82/0,82
	0,74	9,52/9,56/9,81	0,82/0,82/0,82
$h_0 / d_k \ge 1$	0,34	3,99/4,01/4,11	1,62/1,62/1,61
	0,52	6,10/6,13/6,29	1,61/1,62/1,62
	0,74	8,68/8,72/8,95	1,62/1,62/1,62

Примечание. (*) – первая цифра – для $d_k = 0{,}1$ мкм, вторая цифра – для $d_k = 1$ мкм, третья цифра – для $d_k = 10$ мкм.

Важно отметить, что высокую величину коэффициента детерминации $R^2 > 0{,}96$ для зависимостей $P_{km} = f\left(h_0 / d_k\right)$ можно обеспечить разбиением области параметра h_0 / d_k на две части: на $h_0 / d_k \le 1$ и на $h_0 / d_k \ge 1$. При этом показатель степени (коэффициент B) увеличивается практически в 2 раза. Причина указанного изменения требует дополнительного исследования.

Изменения величин коэффициента A при увеличении диаметра капилляра объясняется геометрическими эффектами, сопряжёнными с соотношением диаметра капилляра d_k и размера образца a_0. С увеличением этого соотношения и плотности упаковки капилляров на поверхности слоя наблюдается увеличение капиллярной пористости, которая, по проведённым оценкам, может достигать 1,56 %.

Изменение количества капилляров по слоям образца указывает на реализацию двух вариантов: 1) капилляр в границах слоя является тупиковым или 2) несколько капилляров предыдущего слоя объединяются с капилляром следующего слоя. В этом случае происходит процесс обратного ветвления капилляров, приводящий к их уменьшению в глубинных слоях образца. Очевидно, что фактически реализуются оба выделенных варианта. Этот результат анализа структуры капиллярной пористости характеризует интенсивность сопротивления слоёв материала при движении жидкости в объём материала.

Кроме того, полученные результаты демонстрируют, что как традиционный способ исследования массопоглощения, так и использование образцов малых геометрических размеров из-за масштабного эффекта будут приводить к неадекватным заключениям.

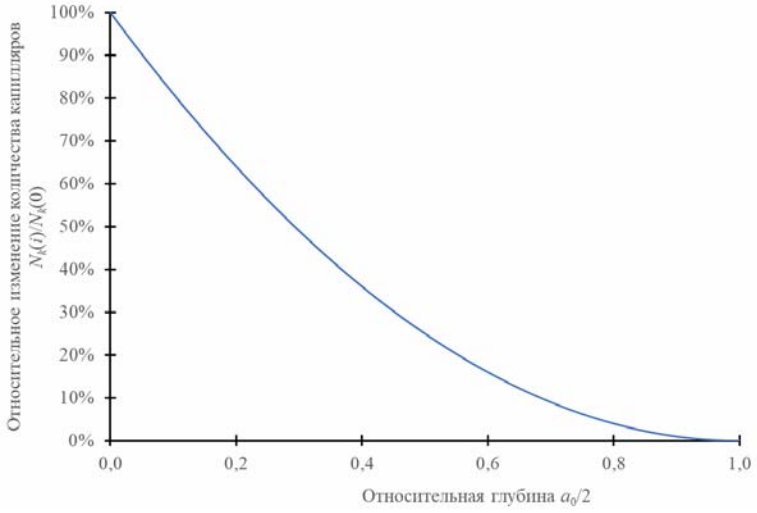


Рис. 3. Изменение количества капилляров по глубине образца

Зависимость относительного количества капилляров, характерная для всех рассмотренных диаметров капилляров, представлена на рис. 3. Данные рисунка демонстрируют, что процесс обратного ветвления капилляров во внешних слоях материала протекает с максимальной скоростью, которая затем снижается с возрастающей интенсивностью при приближении к центру образца (табл. 2).

Таблица 2

Скорость процесса обратного ветвления

Интервал относительной глубины образца, %	Скорость процесса обратного ветвления, %/%	Коэффициент детерминации R^2, %
0-30	1,70	99,81
30-50	1,20	99,82
50-65	0,85	99,79
65-75	0,61	99,82
75-85	0,40	99,56

Таким образом, поровое пространство материала может быть представлено как система капилляров со структурой, состоящей из «тупиковых» капилляров и «дерева» капилляров с основанием, обращённым к центру образца. Характерные особенности капиллярной пористости материала могут быть установлены при решении обратной задачи, т.е. по величине массопоглощения и глубине проникновения жидкости в образец материала.

2. Оценка влияния основных физических факторов. Физические свойства вещества материала и жидкости как отдельно, так и при взаимодействии оказывают значительное влияние на продолжительность массопоглощения. Капиллярный потенциал как основная качественная характеристика кинетики естественной пропитки (массопоглощения) [36] зависит как от геометрических характеристик капилляра (диаметр капилляра d_k) и свойств жидкости (поверхностное натяжение σ и плотность ρ_l), так и от её взаимодействия с поверхностью твёрдого вещества материала (краевой угол смачивания θ):

$$\Psi_k = \frac{\sigma \cos(\theta)}{d_k \rho_l}.$$

Ухудшение смачиваемости материала жидкостью (увеличение краевого угла смачивания) закономерно приводит к увеличению продолжительности массопоглощения (рис. 4, а). Расчёты показывают, что продолжительность массопоглощения возрастает по зависимости, близкой к экспоненциальной. Так, уже при $\theta = 60°$ продолжительность массопоглощения возрастает в 2 раза по сравнению с длительностью поглощения при $\theta = 0°$. При дальнейшем росте краевого угла смачивания интенсивность увеличения длительности массопоглощения возрастает ещё более существенно.

а б

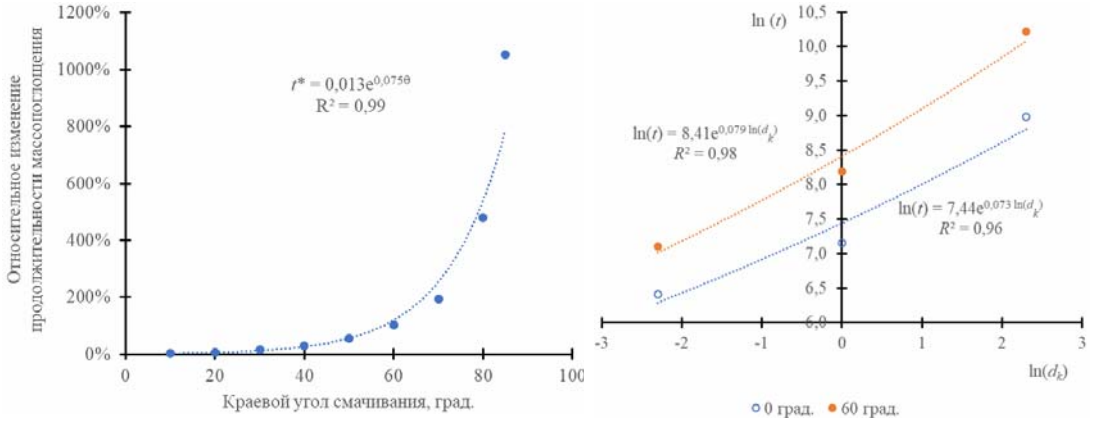


Рис. 4. Зависимости, демонстрирующие влияние краевого угла смачивания (а) и диаметра капилляра (б) на продолжительность массопоглощения (параметры капиллярной пористости материала: $h_0 / d_k \geq 0,25$; $\eta_k = 0,52$)

Существенное влияние на продолжительность массопоглощения естественно оказывает диаметр капилляра (рис. 4, б). Данные демонстрируют, что увеличение диаметра капилляра при прочих равных условиях приводит к значительному росту продолжительности массопоглощения. Так, при $\theta = 0°$ увеличение диаметра капилляра с 0,1 до 1 мкм приводит к росту продолжительности массопоглощения в 2,1 раза, а при увеличении диаметра капилляра с 0,1 до 10 мкм – в 13 раз. Ухудшение смачивания ($\theta = 60°$) приводит к росту продолжительности массопоглощения для указанных интервалов диаметров капилляров в 5,9 и 44,8 раза соответственно.

Типичный характер массопоглощения представлен на рис. 5, а. При этом продолжительность экспозиции при проникновении в глубинные слои материала значительно увеличивается, особенно при приближении к центру образца.

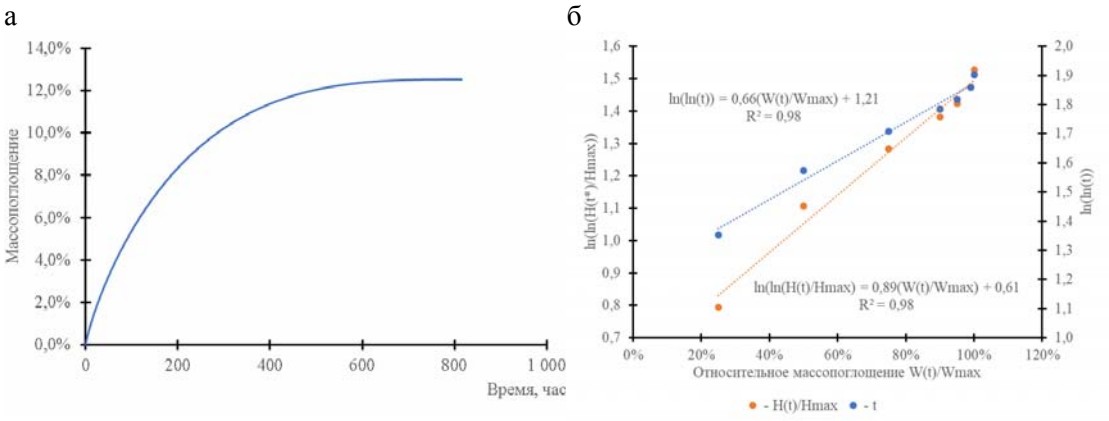


Рис. 5. Типичная кинетическая зависимость массопоглощения (а) и зависимость относительного массопоглощения от продолжительности экспозиции (б)
(параметры капиллярной пористости материала: $h_0 / d_k \geq 0,25$; $\eta_k = 0,52$; $d_k = 0,1$ мкм)

Этот вывод следует из данных рис. 5, б, которые могут быть аппроксимированы с обеспечением коэффициента детерминации более 0,98 функцией вида

$$\ln\left(\ln\left(Y\right)\right) = k_t \left(W\left(t\right) / W_{\max}\right) + b_t$$

(здесь $Y = t$ или $Y = H\left(t\right) / H_{\max}$; k_t и b_t – коэффициенты). Такие значительные временные разрывы (особенно в глубинных слоях) могут создавать градиенты влагонасыщения, а следовательно, условия для неравномерного по объёму (или сечению для протяжённых конструкций) протекания коррозионных процессов.

Плотность жидкости и её поверхностное натяжение оказывают прямо пропорциональное влияние на продолжительность массопоглощения.

Формирование капиллярной пористости из капилляров различного диаметра, естественно, будет приводить к «искривлению» профиля фронта пропитки образца (рис. 6). Такое изменение профиля принято описывать в терминах фрактальной геометрии [36], а исследуемый объект – величиной фрактальной размерности $D_{f,w}$.

Для представленной задачи фрактальная размерность профиля будет находиться в диапазоне $1 \leq D_{f,w} < 2$. Для монокапиллярного порового пространства (рис. 6, а) она будет равна $D_{f,w} = 1$, так как капиллярный потенциал будет величиной постоянной и определяться физическими свойствами жидкости и диаметром капилляра. Для поликапиллярного порового пространства величина фрактальной размерности $D_{f,w}$ зависит от количества капилляров каждого диаметра (рис. 7).

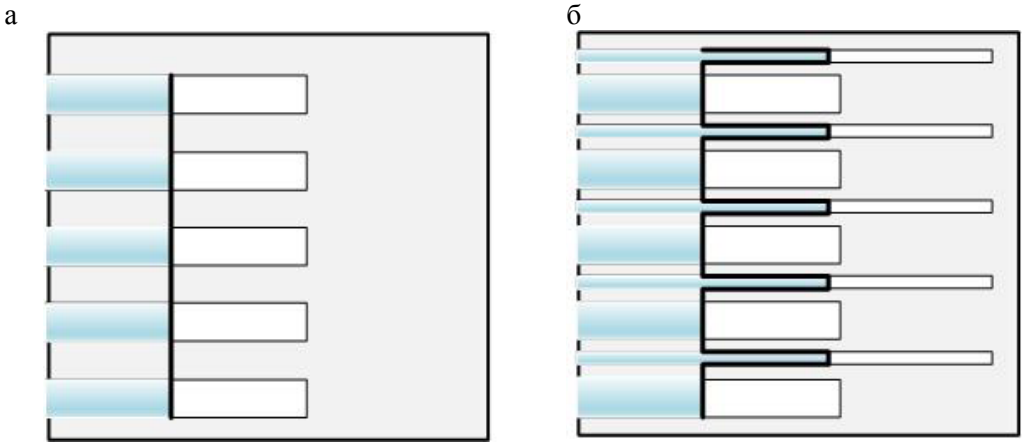


Рис. 6. Изображение профиля фронта пропитки образца:
а – капиллярная пористость, представленная монокапиллярами; б – то же для бикапиллярной пористости (профиль фронта представлен жирной линией чёрного цвета; области голубого цвета – части капилляров, заполненные жидкостью)

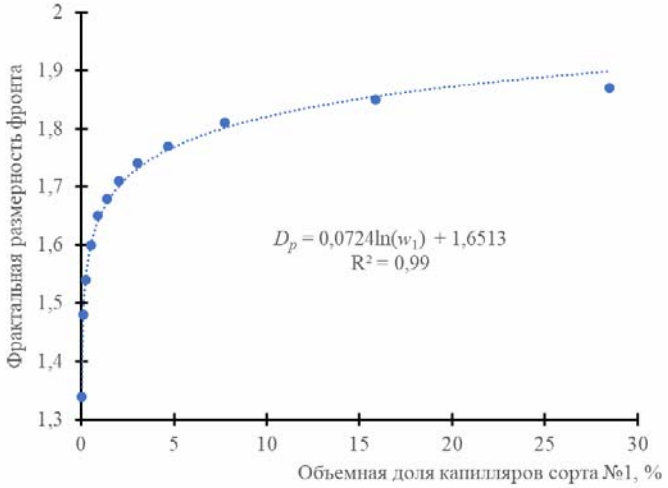


Рис. 7. Зависимость фрактальной размерности профиля фронта пропитки образца от объёмной доли капилляров с $d_{k,1} = 0,1$ мкм (параметры капиллярной пористости материала:

$h_0 / d_k \geq 0,25$; $\eta_k = 0,52$; $d_{k,2} = 1$ мкм)

Вычисление фрактальной размерности профиля фронта пропитки образца проводится по адаптированной к задаче классической формуле

$$D_{f,w} = \frac{\ln\left(L_f / r_{\min}\right)}{\ln\left(L / r_{\min}\right)},$$

где L_f – длина профиля фронта пропитки; L – начальный размер ячейки; $r_{\min}$ – минимальный элемент покрытия профиля фронта.

Данные, представленные на рис. 7, демонстрируют асимптотический характер изменения фрактальной размерности с увеличением доли капилляров с диаметром 0,1 мкм. Это закономерный результат, следующий из развивающегося геометрического искривления профиля фронта пропитки: увеличения L_f при постоянной величине L. При достижении доли капилляров с $d_{k,1} = 0,1$ мкм 100 % фрактальная размерность профиля фронта пропитки снова будет равна $D_{f,w} = 1$. Необходимо отметить, что

полученные оценки величины фрактальной размерности совпадают с экспериментальными данными, представленными в [33].

Заключение

Из представленных данных можно заключить:

1. В первом приближении капиллярную пористость материала можно представить как совокупность капилляров, имеющих различные геометрические характеристики, фактические величины которых могут быть установлены только после проведения экспериментальных исследований, то есть после решения обратной задачи.

2. Капиллярная пористость в соответствии с данной моделью представляется как совокупность тупиковых капилляров и капилляров, последовательно объединяющихся в глубинных слоях образца (обратное ветвление капилляра). Типичная зависимость относительного количества капилляров демонстрирует, что процесс обратного ветвления капилляров внешних слоёв материала протекает с максимальной скоростью. В глубинных слоях эта скорость снижается с возрастающей интенсивностью при приближении к центру образца.

3. Физические факторы (диаметр капилляра, краевой угол смачивания, плотность и поверхностное натяжение жидкости) оказывают закономерное влияние на продолжительность массопоглощения: ухудшение смачивания и увеличение диаметра капилляра приводят к увеличению продолжительности, а поверхностное натяжение жидкости – к сокращению времени массопоглощения.

4. Проведённые аналитические исследования демонстрируют, что при наличии капиллярной пористости и при длительной эксплуатации в контакте с жидкостью в объёме бетонной конструкции будет содержаться жидкость (вода или водный раствор), которая является необходимой как для протекания щелоче-силикатной реакции, так и щелочной коррозии.

Список литературы

1. Рояк, Г.С. Продукты реакции при развитии щелочной коррозии бетона и меры ее предотвращения / Г.С. Рояк, И.В. Грановская // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2014. – № 1 (33). – С. 58–67.

2. Розенталь, Н.К. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя / Н.К. Розенталь, А.Н. Розенталь, Г.В. Любарская // Бетон и железобетон. – 2012. – № 1. – С. 50–60.

3. Брыков, А.С. Щелоче-силикатные реакции и коррозия бетона / А.С. Брыков // Цемент и его применение. – 2009. – № 5. – С. 31–37.

4. Попов, М.Ю. Щелоче-силикатная коррозия в легких бетонах на цементном вяжущем с пористым заполнителем на основе гранулированного пеностекла / М.Ю. Попов, Б.Г. Ким, В.Е. Ваганов, А.С. Брыков // Цемент и его применение. – 2015. – № 4. – С. 89–93.

5. Королев, Е.В. Основные свойства пропиточно-кольматирующих составов для ингибирования щелоче-силикатных реакций / Е.В. Королев, М.И. Вдовин, А.И. Альбакасов, А.С. Иноземцев // Строительные материалы. – 2015. – № 7. – С. 24–29.

6. Королев, Е.В. Влажностные деформации бетона, подверженного щелочной коррозии. Модель процесса / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.В. Михеев, В.А. Гладких // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 4 (81). – С. 134–143.

7. Гришина, А.Н. Влажностные деформации бетона, подверженного щелочной коррозии. Экспериментальные результаты / А.Н. Гришина, Е.В. Королев, А.В. Михеев, В.А. Гладких // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 6 (83). – С. 140–148.

8. Пшембаев, М.К. Поровая структура дорожного бетона / М.К. Пшембаев, В.В. Гиринский, Я.Н. Ковалев, В.Н. Яглов, С.С. Будниченко // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 4. – С. 298–307.

9. Кудрявцев, П.Г. Структура пор в твердых пористых телах. Часть I / П.Г. Кудрявцев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2018. – Т. 10, № 5. – С. 80–103.

10. Кудрявцев, П.Г. Структура пор в твердых пористых телах. Часть II / П.Г. Кудрявцев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2018. – Т. 10, № 6. – С. 124–155.

11. Габидуллин, М.Г. Структурная организация цементного камня / М.Г. Габидуллин, А.Ф. Хузин, Р.З. Рахимов, А.Н. Габидуллина, О.В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 1. – С. 53–58.

12. Федосов, С.В. Физические особенности проблем жидкостной коррозии железобетона с позиций теории тепломассопереноса / С.В. Федосов, И.В. Красильников, В.Е. Румянцева, И.А. Красильникова // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2023. – Т. 19, № 4. – С. 392–409.

13. Федосов, С.В. Исследование диффузионных процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, Н.Л. Федосова // Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, вып. 1. – С. 99–104.

14. Федосов, С.В. Кольматация: явление, теория, перспективы применения для управления процессами коррозии бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, А.С. Евсяков // Строительные материалы. – 2017. – № 10. – С. 10–17.

15. Федосов, С.В. Массоперенос при жидкостной коррозии второго вида цементного бетона, контролируемый диффузно-кинетическим сопротивлением / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко // Строительные материалы. – 2011. – №1. – С. 50–52.

16. Гусев, Б.В. Основы математической теории процессов коррозии бетона / Б.В. Гусев, А.С. Файвусович. – М.: Научный мир, 2006. – 40 с.

17. Федосов, С.В. Математическое моделирование массопереноса в процессах коррозии бетона второго вида / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко // Строительные материалы. – 2008. – № 7. – С. 35–39.

18. Румянцева, В.Е. Математическое моделирование коррозии бетонных конструкций в биологически агрессивных средах / В.Е. Румянцева, С.А. Логинова, Н.Е. Карцева // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2021. – № 3 (102). – С. 56–67.

19. Логинова, С.А. Моделирование кинетики и динамики протекания массопереноса при различных видах коррозии цементных бетонов / С.А. Логинова, И.Н. Гоглев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 6 (99). – С. 22–35.

20. Калашников, В.И. Коррозионная стойкость цементно-песчаных растворов в агрессивной среде / В.И. Калашников, К.Н. Махамбетова // Строительные материалы. – 2010. – №11. – С. 12–13.

21. Овчинников, И.И. Анализ экспериментальных данных по кинетике проникания сульфатсодержащих сред в железобетонные конструкции и влиянию их на механические характеристики компонентов железобетона. Часть 1. Эксперименты по изучению кинетики проникания / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Чэнь Тао, А.М. Успанов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. – Т. 8, №1. – URL: http://naukovedenie.ru/ PDF/51TVN116.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. Рус., англ. – DOI: 10.15862/51TVN116.

22. Овчинников, И.И. Анализ экспериментальных данных по кинетике проникания сульфатсодержащих сред в железобетонные конструкции и влиянию их на механические характеристики компонентов железобетона. Часть 2. Влияние на механические характеристики железобетона / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Чэнь Тао, А.М. Успанов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Т. 8, №2. – URL: http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN216.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. – DOI: 10.15862/11TVN216.

23. Федосов, С.В. Исследование влияния процессов массопереноса на надежность и долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, С.А. Логинова // Строительные материалы. – 2017. – № 12. – С. 52–57.

24. Новиков, Е.В. Кинетические процессы в композитах при воздействии агрессивных сред / Е.В. Новиков, П.В. Воронов, А.В. Лахно, А.Н. Бобрышев // Международный технико-экономический журнал. – 2014. – № 6. – С. 95–102.

25. Черемской, П.Г. Поры в твердом теле / П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 375 с.

26. Чуканов, А.Н. Математическое моделирование полей напряжений у стресс-коррозионных дефектов / А.Н. Чуканов, В.А. Терёшин, Е.В. Цой // Современные материалы, техника и технологии. – 2021. – № 6 (39). – С. 65–70.

27. Баюк, И.О. Роль учета внутреннего строения пород при построении их петроупругих моделей / И.О. Баюк // Геофизика. – 2022. – № 3. – С. 2–8.

28. Ульева, Г.А. Виды пористой структуры твердых углеродсодержащих восстановителей / Г.А. Ульева // Кокс и химия. – 2022. – № 2. – С. 32–35.

29. Ефремов, И.Б. Научное обоснование инженерных расчётов экстрактора с пульсацией растворителя в слое частиц, обладающих упругой пористой структурой / И.Б. Ефремов, А.Н. Николаев, В.Ф. Шарафутдинов, Б.А. Ефремов // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 349–353.

30. Бабенко, Ю.И. Экстрагирование из фрактальной системы ветвящихся капилляров / Ю.И. Бабенко, Е.В. Иванов // Теоретические основы химической технологии. – 2009. – Т. 43, №1. – С. 99–104.

31. Барабанов, В.Л. Эмпирические параметры модели противоточной капиллярной пропитки горных пород / В.Л. Барабанов // Геофизические исследования. – 2014. – Т.15, №1. – С. 27–52.

32. Барабанов, В.Л. Фрактальная модель начальной стадии капиллярной пропитки горных пород / В.Л. Барабанов // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. – 2016. – № 1 (13). – С. 5.

33. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

34. Шкловский, Б.И. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред / Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос // Успехи физических наук. 1975. – Т. 117, Вып. 3. – С. 401–435.

35. Королев, Е.В. Метод анализа кинетики поглощения. Часть 1. Теоретические основы / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, М.И. Вдовин, А.И. Альбакасов // Строительные материалы. – 2016. – №5. – С. 43–47.

36. Тучинский, Л.И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки / Л.И. Тучинский. – М.: Металлургия, 1988. – 208 с.

References

1. Royak, G.S. Reaction products in the development of alkaline corrosion of concrete and measures to prevent it / G.S. Royak, I.V. Granovskaya // ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes. – 2014. – No. 1 (33). – P. 58–67.

2. Rosenthal, N.K. Corrosion of concrete in the interaction of alkalis with silica filler / N.K. Rosenthal, A.N. Rosenthal, G.V. Lyubarskaya // Concrete and reinforced concrete. – 2012. – No. 1. – P. 50–60.

3. Brykov, A.S. Alkali-silicate reactions and corrosion of concrete / A.S. Brykov // Cement and its application. – 2009. – No. 5. – P. 31–37.

4. Popov, M.Yu. Alkali-silicate corrosion in light concretes on a cement binder with a porous filler based on granular foam glass / M.Yu. Popov, B.G. Kim, V.E. Vaganov, A.S. Brykov // Cement and its application. – 2015. – No. 4. – P. 89–93.

5. Korolev, E.V. Basic properties of impregnating-colmatating compounds for inhibition of alkali-silicate reactions / E.V. Korolev, M.I. Vdovin, A.I. Albakasov, A.S. Inozemtsev // Building materials. – 2015. – No. 7. – P. 24–29.

6. Korolev, E.V. Moisture deformations of concrete exposed to alkaline corrosion. Process model / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.V. Mikheev, V.A. Gladkikh // Bulletin of Civil Engineers. – 2020. – No. 4 (81). – P. 134–143.

7. Grishina, A.N. Moisture deformations of concrete exposed to alkaline corrosion. Experimental results / A.N. Grishina, E.V. Korolev, A.V. Mikheev, V.A. Gladkikh // Bulletin of Civil Engineers. – 2020. – No. 6 (83). – P. 140–148.

8. Pshembaev, M.K. Pore structure of road concrete / M.K. Pshembaev, V.V. Girinsky, Ya.N. Kovalev, V.N. Yaglov, S.S. Budnichenko // Science and Technology. – 2016. – Vol. 15, No. 4. – P. 298–307.

9. Kudryavtsev, P.G. The structure of pores in solid porous bodies. Part I / P.G. Kudryavtsev // Nanotechnology in construction: scientific online journal. – 2018. – Vol. 10, No. 5. – P. 80–103.

10. Kudryavtsev, P.G. The structure of pores in solid porous bodies. Part II / P.G. Kudryavtsev // Nanotechnology in construction: scientific online journal. – 2018. – Vol. 10, No. 6. – P. 124–155.

11. Gabidullin, M.G. Structural organization of cement stone / M.G. Gabidullin, A.F. Khuzin, R.Z. Rakhimov, A.N. Gabidullina, O.V. Stoyanov // Bulletin of the Kazan Technological University. – 2014. – Vol. 17, No. 1. – P. 53–58.

12. Fedosov, S.V. Physical features of the problems of liquid corrosion of reinforced concrete from the standpoint of the theory of heat and mass transfer / S.V. Fedosov, I.V. Krasilnikov, V.E. Rumyantseva, I.A. Krasilnikova // Construction mechanics of engineering structures and structures. – 2023. – Vol. 19, No. 4. – P. 392–409.

13. Fedosov, S.V. Investigation of diffusion processes of mass transfer in liquid corrosion of the first type of cement concretes / S.V. Fedosov, V.E. Rumyantseva, I.V. Krasilnikov, N.L. Fedosova // Chemistry and chemical technology. – 2015. – Vol. 58, Issue 1. – P. 99–104.

14. Fedosov, S.V. Colmatation: phenomenon, theory, prospects of application for controlling concrete corrosion processes / S.V. Fedosov, V.E. Rumyantseva, V.S. Konovalova, A.S. Evsyakov // Building materials. – 2017. – No. 10. – P. 10–17.

15. Fedosov, S.V. Mass transfer in liquid corrosion of the second type of cement concrete, controlled by diffuse kinetic resistance / S.V. Fedosov, V.E. Rumyantseva, N.S. Kasyanenko // Building materials. – 2011. – No.1. – P. 50–52.

16. Gusev, B.V. Fundamentals of the mathematical theory of concrete corrosion processes / B.V. Gusev, A.S. Fayvusovich. – M.: Scientific world, 2006. – 40 p.

17. Fedosov, S.V. Mathematical modeling of mass transfer in the processes of corrosion of concrete of the second type / S.V. Fedosov, V.E. Rumyantseva, N.S. Kasyanenko // Building materials. – 2008. – No. 7. – P. 35–39.

18. Rumyantseva, V.E. Mathematical modeling of corrosion of concrete structures in biologically aggressive environments / V.E. Rumyantseva, S.A. Loginova, N.E. Kartseva // Bulletin of Cherepovets State University. – 2021. – No. 3 (102). – P. 56–67.

19. Loginova, S.A. Modeling of kinetics and dynamics of mass transfer in various types of corrosion of cement concretes / S.A. Loginova, I.N. Goglev // Bulletin of Cherepovets State University. – 2020. – No. 6 (99). – P. 22–35.

20. Kalashnikov, V.I. Corrosion resistance of cement-sand solutions in an aggressive environment / V.I. Kalashnikov, K.N. Makhambetova // Building materials. – 2010. – No.11. – P. 12–13.

21. Ovchinnikov, I.I. Analysis of experimental data on the kinetics of penetration of sulfate-containing media into reinforced concrete structures and their effect on the mechanical characteristics of reinforced concrete components. Part 1. Experiments on the study of penetration kinetics / I.I. Ovchinnikov, I.G. Ovchinnikov, Chen Tao, A.M. Uspanov // Online journal «SCIENCE STUDIES». – 2016. – Vol. 8, No. 1. – URL: http://naukovedenie.ru/PDF/51TVN116.pdf (access is free). Cover from the screen. Russian, English. – DOI: 10.15862/51TVN116.

22. Ovchinnikov, I.I. Analysis of experimental data on the kinetics of penetration of sulfate-containing media into reinforced concrete structures and their effect on the mechanical characteristics of reinforced concrete components. Part 2. Influence on the mechanical characteristics of reinforced concrete / I.I. Ovchinnikov, I.G. Ovchinnikov, Chen Tao, A.M. Uspanov // Online journal «Science STUDIES». – 2016. – Vol. 8, No. 2. – URL:

http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN216.pdf (access is free). Cover from the screen. Russian, English. – DOI: 10.15862/11TVN216.

23. Fedosov, S.V. Investigation of the influence of mass transfer processes on the reliability and durability of reinforced concrete structures operated in liquid aggressive media / S.V. Fedosov, V.E. Rumyantseva, I.V. Krasilnikov, S.A. Loginova // Building materials. – 2017. – No. 12. – P. 52–57.

24. Novikov, E.V. Kinetic processes in composites under the influence of aggressive media / E.V. Novikov, P.V. Voronov, A.V. Lakhno, A.N. Bobryshev // International Technical and Economic Journal. – 2014. – No. 6. – P. 95–102

25. Cheremskoy, P.G. Pores in a solid / P.G. Cheremskoy, V.V. Slezov, V.I. Betekhtin. – Moscow: Energoatomizdat, 1990. – 375 p.

26. Chukanov, A.N. Mathematical modeling of stress fields in stress-corrosion defects / A.N. Chukanov, V.A. Tereshin, E.V. Tsoi // Modern materials, equipment and technologies. – 2021. – No. 6 (39). – P. 65–70.

27. Bayuk, I.O. The role of accounting for the internal structure of rocks in the construction of their petroelastic models / I.O. Bayuk // Geophysics. – 2022. – No. 3. – P. 2–8.

28. Uleva, G.A. Types of porous structure of solid carbon-containing reducing agents / G.A. Uleva // Coke and chemistry. – 2022. – No. 2. – P. 32–35.

29. Efremov, I.B. Scientific substantiation of engineering calculations of an extractor with solvent pulsation in a layer of particles with an elastic porous structure / I.B. Efremov, A.N. Nikolaev, V.F. Sharafutdinov, B.A. Efremov // Bulletin of the Technological University. – 2015. – Vol. 18, No. 2. – P. 349–353.

30. Babenko, Yu.I. Extraction from the fractal system of branching capillaries / Yu.I. Babenko, E.V. Ivanov // Theoretical foundations of chemical technology. – 2009. – Vol. 43, No. 1. – P. 99–104.

31. Barabanov, V.L. Empirical parameters of the model of countercurrent capillary impregnation of rocks / V.L. Barabanov // Geophysical research. – 2014. – Vol.15, No. 1. – P. 27–52.

32. Barabanov, V.L. Fractal model of the initial stage of capillary impregnation of rocks / V.L. Barabanov // Georesources, geoenergetics, geopolitics. – 2016. – No. 1 (13). – P. 5.

33. Feder, E. Fractals / E. Feder. – M.: Mir, 1991. – 254 p.

34. Shklovsky, B.I. Theory of flow and conductivity of strongly inhomogeneous media / B.I. Shklovsky, A.L. Efros // Successes of physical sciences. 1975. – Vol. 117, Issue 3. – P. 401–435.

35. Korolev, E.V. Method of analysis of absorption kinetics. Part 1. Theoretical foundations / E.V. Korolev, A.N. Grishina, M.I. Vdovin, A.I. Albakasov // Building materials. – 2016. – No.5. – P. 43–47.

36. Tuchinsky, L.I. Composite materials obtained by impregnation / L.I. Tuchinsky. – M.: Metallurgy, 1988. – 208 p.

УДК 69:008.1 DOI 10.54734/20722958_2024_3_19

Московский политехнический университет
Россия, 107023, г. Москва,
ул. Б.Семёновская, д. 38
Будылина Евгения Александровна,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Инфокогнитивные технологии»
E-mail: bud-ea@yandex.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77
Гарькина Ирина Александровна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Математика и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru
Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН,
главный редактор РИО
E-mail: fmatem@pguas.ru

Moscow Polytechnic University
Russia, 107023, Moscow,
38, B.Semenovskaya St.
Budylina Eugenia Aleksandrovna,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department «Infocognitive technologies»
E-mail: bud-ea@yandex.ru
Penza State University of Architecture and Construction
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77
Garkina Irina Aleksandrovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Mathematics and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru
Danilov Aleksander Maksimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences, editor-in-chief of the editorial and publishing department
E-mail: fmatem@pguas.ru

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И ЗАКОНЫ РАЗВИТИЯ: СИНТЕЗ КОМПОЗИТОВ

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

В связи с недостаточностью традиционных подходов формируется новая методология научных исследований в строительном материаловедении. Особое внимание уделяется выявлению закономерностей формирования материалов как систем; универсальные закономерности помогают определять заранее, в каком направлении и в каких пределах может происходить развитие систем и в каких пределах и направлениях исключается их совершенствование. Существование системы определяется некоторыми основными определяющими ее параметрами. Их сохранение поддерживает существование самой системы и определяет ее гомеостаз. Системный (общий) гомеостаз обеспечивает сохранение интегративного качества, а частный – конкретной компоненты. Отмечается, что среди различных теорий систем в настоящее время еще не существует универсальной, пригодной для различных практических приложений. Определяется роль структурных исследований строительных материалов (строение, фазовый состав, связи, топология.; динамические характеристики, стойкость в эксплуатационной среде, экономическая эффективность).

Ключевые слова: композиционные материалы, анализ и синтез, методы, сложные системы, аналитические методы

SYSTEM APPROACH AND LAWS OF DEVELOPMENT: SYNTHESIS OF COMPOSITES

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

Due to the insufficiency of traditional approaches, a new methodology of scientific research in construction materials science is being formed. Particular attention is paid to identifying patterns of formation of materials as systems; universal laws help to determine in advance in what direction and within what limits the development of systems can occur and within what limits and directions their improvement is excluded. The existence of a system is determined by some basic parameters that

define it. Their preservation supports the existence of the system itself and determines its homeostasis. Systemic (general) homeostasis ensures the preservation of integrative quality, and private homeostasis ensures the preservation of a specific component. It should be noted that among various theories of systems, there is currently no universal one suitable for various practical applications. The role of structural studies of building materials is determined (structure, phase composition, connections, topology; dynamic characteristics, durability in the operating environment, economic efficiency)

Keywords: composite materials, analysis and synthesis, methods, complex systems, analytical methods

Знание универсальных закономерностей формирования материалов как систем позволяет определить заранее, в каком направлении и в каких пределах следует изучать развитие систем (или исключить их совершенствование). Существование системы определяется некоторыми ее параметрами, определяющими ее гомеостаз: системный обеспечивает сохранение интегративного качества, а частный – конкретной компоненты [1, 2]. Пока нет универсальной теория систем, пригодной для различных практических приложений (определяющую роль играют структурные исследования строительных материалов: строение, фазовый состав, связи, топология; динамические характеристики, стойкость в эксплуатационной среде, экономическая эффективность). Исходя из этого, нами рассматриваются методологические основы системных исследований по разработке композиционных материалов как сложных систем с соответствующими системными атрибутами [3–5]; наличие универсальных законов, закономерностей и системных изоморфизмов позволяет переносить знания из одной предметной области в другую. В динамических системах системные законы и закономерности, способы поведения систем в течение существования системы неизменны. В изменяющихся системах периодически меняются законы поведения, структура, пути эволюции, внутренние симметрии, системные законы и закономерности. В концепции таких систем основой являются их неравновесность и неустойчивость, а их равновесие – исключение. В сложных системах основную роль играет информационная компонента, учитывающая качественные, уникальные характеристики отдельных элементов и отношений между ними (сложность – проблема структуры). Будучи ориентированным на постижение сложного объекта как целого, системный подход для упрощения решения не исключает декомпозиции сложных систем, но главное – последующий их синтез, который обеспечивает приоритет целого (для ряда сложных систем оптимум всей системы нельзя получить из оптимумов ее подсистем; связи настолько сложные, сильные и не могут рассматриваться как взаимодействие между частями системы). В физических системах свойство целостности соответствует локальности (влияние одной части этой системы на другую нельзя объяснить взаимодействием между ними); в целостной системе связи не причинно-следственные, а структурные.

Вся теория управления сложной системой представляет борьбу с неопределенностью описания объекта (управлять – значит предвидеть). Чем меньше взаимозависимы элементы сложной системы, тем проще оптимизировать систему (удалив лишние связи) и тем быстрее система может восстановить общую нормальную деятельность в случае сбоя в одном из элементов. Относительная автономность элементов в сложной системе делает ее более устойчивой. Сложность понимается как определенная физическая характеристика природы и рассматривается как свойство, обусловленное внутренней закономерностью системы. Сложность и нелинейность часто рассматриваются как синонимы (нелинейность внутренних закономерностей лежит в основе сложности природных систем). Когда уровень сложности оказывается превышен (критический уровень), более целесообразно децентрализованное управление. Сложные системы управления невозможно однозначно адекватно описать классическими математическими методами; математические модели пригодны только для описания наиболее общих свойств и закономерностей; всегда остается широкий круг вопросов, которые не могут быть описаны на основе существующих формальных методов. При невозможности математически точно сформулировать задачу применяются когнитивные методы анализа. При характеристике многих сложных систем

налицо «системный кризис»: наличие сложной структуры причинно-следственных связей не позволяет решить возникшую проблему (выделение подсистемы из системы); цели всей системы и следующие из них правила взаимодействия частей не могут быть подменены целями и интересами какой-либо подсистемы; есть опасность распада и деградации системы.

С позиций синергетики накопление знаний – нелинейный процесс; система знаний представляет сложную самоорганизующуюся систему, в которой один единственный новый факт может вызвать изменения в привычной структуре представлений. Самоорганизация рождается самой системой в результате потери устойчивости некоего состояния как фазового перехода; возможны и обратные процессы (при переходе устойчивых систем в состояние хаоса). Здесь структура системы определяет состояние, возникающее в результате согласованного поведения большого числа частиц системы; иногда такие структуры рассматриваются как диссипативные, которые за счет обмена с внешней средой из однородного состояния равновесия необратимо переходят в другое состояние равновесия. Нередко поведение сложной системы описывается очень малым количеством параметров (параметр порядка), а не многочисленными параметрами вектора состояния, как это может показаться сначала. В состояниях, близких к фазовому переходу, сложная система, которая обычно описывается многими параметрами, как будто упрощается (сжатие информации и переход от многочисленных параметров состояния к немногочисленным параметрам порядка). Как видим, синергетическая концепция в теории управления опирается на идею целенаправленной самоорганизации сложных систем.

При системном подходе технологический процесс рассматривается как сложная система, состоящая из элементов различных уровней детализации; анализ отдельных стадий процесса без выявления взаимосвязи между ними и с окружающей средой не дает возможности судить обо всем технологическом процессе. Выделяются несколько уровней иерархии, между которыми существуют отношения соподчиненности. На первом уровне располагаются элементарные процессы технологии (химические, массообменные, тепловые, механические, гидромеханические), на более высоких – элементы, которые выделяются по какому-либо признаку, например, по административно-хозяйственному или производственному (цеха, производства, предприятия и т.д.). При анализе отдельного процесса в качестве элементов или ступеней иерархии могут выступать явления, в совокупности определяющие целевую функцию процесса (химическое превращение, теплообмен и т.д.). Системный подход к исследованию технологических процессов преследует цель получения оценок функционирования процесса на любом уровне декомпозиции и осуществляется в несколько этапов; отдельный элемент системы в зависимости от поставленной цели может рассматриваться как отдельная система с более детализованными уровнями декомпозиции.

Практическое применение указанного подхода при разработке композитов с регулируемыми структурой и свойствами (как сложных систем) связано с использованием аналитических методов синтеза [6]. В качестве иллюстрации ограничимся рассмотрением задачи синтеза для системы с несколькими входами и выходами [7]:

$$z_1 = a_{11}\,x_1 + \cdots + a_{1j}\,x_j + \cdots + a_{1m}\,x_m,$$
$$\vdots$$
$$z_i = a_{i1}\,x_1 + \cdots + a_{ij}\,x_j + \cdots + a_{im}\,x_m,$$
$$\vdots$$
$$z_n = a_{n1}\,x_1 + \cdots + a_{nj}\,x_j + \cdots + a_{nm}\,x_m,$$

или в векторной форме

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}\cdot\mathbf{x},$$
$$\mathbf{z} \overset{\Delta}{=} \left(z_1 \cdots z_i \cdots z_n\right)^{\mathrm{T}},\ \mathbf{x} \overset{\Delta}{=} \left(x_1 \cdots x_j \cdots x_m\right)^{\mathrm{T}};$$

$$\mathbf{A} \overset{\Delta}{=} \begin{bmatrix} a_{11} \cdots a_{1m} \\ \vdots \\ a_{n1} \cdots a_{nm} \end{bmatrix};$$

$\overset{\Delta}{=}$ – равенство по определению.

Так что *i*-ю строку уравнения можно записать в виде

$$\mathbf{z}_i = \mathbf{x}^{\mathrm{T}}\, \mathbf{a}_i\,,$$

$$\mathbf{a}_i \overset{\Delta}{=} \left[a_{i1}\; a_{i2} \cdots a_{ij} \cdots a_{im} \right]^{\mathrm{T}}.$$

Для *r* измерений ($r \geq m + 1$) величины z_i, x_j ($i = 1, \ldots, n$; $j = 1, \ldots, m$) определятся в виде

$$\boldsymbol{\chi}_i \overset{\Delta}{=} \begin{bmatrix} z_i^{(1)} \\ \vdots \\ z_i^{(\mu)} \\ \vdots \\ z_i^{(r)} \end{bmatrix},\; \mathbf{U} \overset{\Delta}{=} \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & \cdots & x_m^{(1)} \\ & \vdots & \\ x_1^{(\mu)} & \cdots & x_m^{(\mu)} \\ & \vdots & \\ x_1^{(r)} & \cdots & x_m^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^{(1)\mathrm{T}} \\ \vdots \\ x^{(\mu)\mathrm{T}} \\ \vdots \\ x^{(r)\mathrm{T}} \end{bmatrix}.$$

Индекс в скобках (μ) означает μ-ю совокупность измерений (μ = 1, 2, ..., *r*). Поэтому указанные выше *r* измерений для *i*-го выхода удовлетворяют соотношениям

$$z_i^{(1)} = x^{(1)\mathrm{T}}\, a_i$$
$$\vdots$$
$$z_i^{(\mu)} = x^{(\mu)\mathrm{T}}\, a_i$$
$$\vdots$$
$$z_i^{(r)} = x^{(r)\mathrm{T}}\, a_i$$

или в матричной форме

$$\mathbf{z_i} = \mathbf{U}\, \mathbf{a_i}\,.$$

Наилучшие в смысле регрессии по методу наименьших квадратов оценки $\hat{\mathbf{a}}_i \forall i$ удовлетворяют соотношению

$$\hat{\mathbf{a}}_i = \left(\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\, \mathbf{U} \right)^{-1} \mathbf{U}^{\mathrm{T}}\, \boldsymbol{\chi}_i = \left(\hat{a}_{1i} \cdots \hat{a}_{mi} \right).$$

Отметим, при идентификации $\hat{\mathbf{a}}_i$ предполагается, что $r \geq m+1$ (как и для случая с одним выходом). Поскольку для всех *i* рассматривается одна и та же матрица измерений **U,** то все элементы матрицы **A** можно полностью идентифицировать по $m+1$ измерениям (при этом одновременно идентифицируются a_i для всех *i*). Приведенное легко распространяется на регрессионную идентификацию динамической системы, описываемую уравнением

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\alpha}\, \mathbf{x} + \boldsymbol{\beta}\, \mathbf{u}\,,$$

где $\mathbf{x}$, $\mathbf{u}$ – *n*-мерный вектор состояния и *m*-мерный вектор управления (вход) соответственно; $\boldsymbol{\alpha}$, $\boldsymbol{\beta}$ – матрицы коэффициентов. Действительно,

$$\mathbf{x}_k \overset{\Delta}{=} \mathbf{x}\left(t_k\right) \overset{\Delta}{=} \mathbf{x}\left(k\, \Delta t\right);$$

$$\mathbf{x}_{k+1} \overset{\Delta}{=} \mathbf{x}\left(t_{k+1}\right) \overset{\Delta}{=} \mathbf{x}\left[\left(k+1\right) \Delta t\right].$$

Тогда при $t = t_k \overset{\Delta}{=} k\, \Delta t$ получим

$$\frac{\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k}{\Delta t} \approx \boldsymbol{\alpha}\, \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\beta}\, \mathbf{u}_k\,,$$

$$\mathbf{x}_{k+1} \approx \mathbf{x}_k + (\alpha \Delta t)\mathbf{x}_k + (\beta \Delta t)\mathbf{u}_k .$$

Откуда

$$\mathbf{x}_{k+1} \approx \mathbf{E}\,\mathbf{x}_k + (\alpha \Delta t)\mathbf{x}_k + (\beta \Delta t)\mathbf{u}_k = (\mathbf{E} + \alpha \Delta t)\mathbf{x}_k + (\beta \Delta t)\mathbf{u}_k .$$

Введя

$$\mathbf{A} \overset{\Delta}{=} \mathbf{E} + \alpha \Delta t = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+\alpha_{11}\Delta t & \cdots & \alpha_{1n}\Delta t \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \alpha_{n1}\Delta t & \cdots & 1+\alpha_{nn}\Delta t \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} \overset{\Delta}{=} \beta \Delta t = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1m} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11}\Delta t & \cdots & b_{1n}\Delta t \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{n1}\Delta t & \cdots & b_{nm}\Delta t \end{bmatrix},$$

получим приближённое уравнение

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\,\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\,\mathbf{u}_k .$$

Введём далее (n + m)-мерный вектор

$$\mathbf{W}_k \overset{\Delta}{=} \left(x_1^k, x_2^k, \ldots x_n^k, u_1^k, u_2^k, \ldots, u_m^k\right)^{\mathrm{T}}$$

и ($n \times (n + m)$)-матрицу

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} a_{11} & \ldots & a_{1n}\,b_{11} & \ldots & b_{1m} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{n1} & \ldots & a_{nn}\,b_{n1} & \ldots & b_{nm} \end{bmatrix};$$

Получим

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{\Phi}\,\mathbf{W}_k$$

(при стационарной матрице **Φ** справедливо для всех k); в развёрнутом виде имеем:

$$x_1^{k+1} = a_{11}\,x_1^k + \ldots + a_{1n}\,x_n^k + b_{11}\,u_1^k + \ldots + b_{1m}\,u_m^k ;$$

$$x_2^{k+1} = a_{21}\,x_1^k + \ldots + a_{2n}\,x_n^k + b_{21}\,u_1^k + \ldots + b_{2m}\,u_m^k ;$$

$$\ldots$$

$$x_n^{k+1} = a_{n1}\,x_1^k + \ldots + a_{nn}\,x_n^k + b_{n1}\,u_1^k + \ldots + b_{nm}\,u_m^k .$$

Вид рассматриваемой системы приведен на рис. 1.

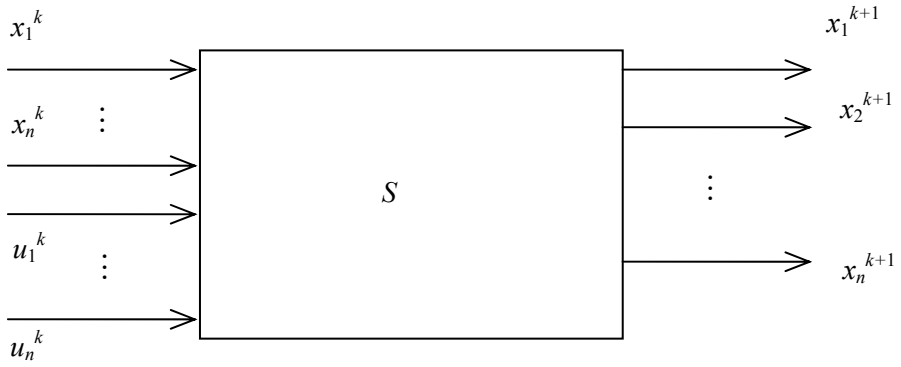


Рис. 1. Структурная схема системы с несколькими входами и выходами

Так как x_1^{k+1}, ..., x_n^{k+1} определяются изолированно, то для x_i^{k+1}, определяемой i-м уравнением, справедлива схема, приведённая на рис. 2.

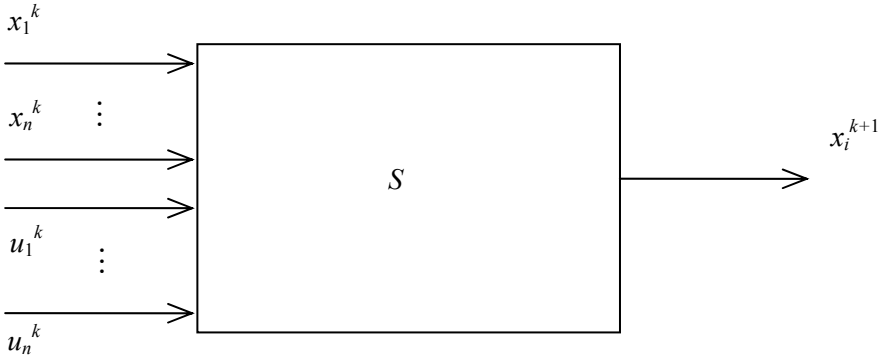


Рис. 2. Структурная схема системы с одним выходом

Для регрессионной идентификации параметров управления

$$x_i^{k+1} = a_{i1}\, x_1{}^k + \ldots + a_{i\,n}\, x_n{}^k + b_{i1}\, u_1{}^k + \ldots + b_{i\,m}\, u_m{}^k \; (i = \overline{1, n})$$

необходимо иметь $r \geq n + m + 1$ совокупностей синхронных измерений x_i^{k+1} и x_1^k, ..., x_n^k, $u_1{}^k$, ... , $u_m{}^k$.

В качестве таких измерений примем

$$x_{i(1)}^{k+1} = x_i^1; \quad x_{1(1)}^k = x_1^0, \ldots, \quad x_{n(1)}^k = x_n^0, u_{1(1)}^k = u_1^0, \ldots, \quad u_{m(1)}^k = u_m^0;$$

...

$$x_{i(r)}^{k+1} = x_i^r; \quad x_{1(r)}^k = x_1^{r-1}, \ldots, \quad x_{n(r)}^k = x_n^{r-1}, u_{1(r)}^k = u_1^{r-1}, \ldots, \quad u_{m(r)}^k = u_m^{r-1}.$$

Введя

$$\mathbf{u}_{(\mu)} = \left[x_1^{\mu-1}, \ldots, x_n^{\mu-1}, u_1^{\mu-1}, \ldots, u_m^{\mu-1} \right]^{\mathrm{T}} = \mathbf{W}_{(\mu-1)};$$

$$\mathbf{a}_i = \left[a_{i1}, \ldots, a_{in}, b_{i1}, \ldots, b_{im} \right]^{\mathrm{T}},$$

получим, что указанные выше r измерений для i-го выхода x_i^{k+1} удовлетворяют соотношениям

$$x_{i(1)}^{k+1} = \overline{u}_{(1)}^{\mathrm{T}}\, \overline{a}_i;$$

$$\ldots$$

$$x_{i(\mu)}^{k+1} = \overline{u}_{(\mu)}^{\mathrm{T}}\, \overline{a}_i;$$

$$\ldots$$

$$x_{i(r)}^{k+1} = \overline{u}_{(r)}^{\mathrm{T}}\, \overline{a}_i,$$

или в матричной форме

$$\boldsymbol{\chi} = \mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\alpha}_i,$$

где

$$\boldsymbol{\chi} = \left[x_i^1, x_i^2, \ldots, x_i^n \right]^{\mathrm{T}};$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} x_1^0 & \ldots & x_n^0\, u_1^0 & \ldots & u_m^0 \\ x_1^{\mu-1} & \ldots & x_n^{\mu-1}\, u_1^{\mu-1} & \ldots & u_m^{\mu-1} \\ x_1^{r-1} & \ldots & x_n^{r-1}\, u_1^{r-1} & \ldots & u_m^{r-1} \end{bmatrix}.$$

Для оценок параметров $\mathbf{a}_i \ \forall_i$ справедливы соотношения:

$$\hat{\mathbf{a}}_i = \left(\mathbf{U}^{\mathbf{T}}\,\mathbf{U}\right)^{-1}\mathbf{U}^{\mathbf{T}}\boldsymbol{\chi}_i = \begin{bmatrix} a_{i1} \\ \vdots \\ a_{in} \\ b_{i1} \\ \vdots \\ b_{im} \end{bmatrix};\ \boldsymbol{\Phi}^{\mathbf{T}} = \left(\mathbf{U}^{\mathbf{T}}\,\mathbf{U}\right)^{-1}\mathbf{U}^{\mathbf{T}}\boldsymbol{\chi},\ \boldsymbol{\chi} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 \\ \dots & & & \\ x_1^n & x_2^n & \dots & x_n^n \end{bmatrix}.$$

Выводы

Определены методологические основы системных исследований по разработке композиционных материалов как сложных систем с соответствующими системными атрибутами. Особое внимание уделяется выявлению закономерностей: системный (общий) гомеостаз обеспечивает сохранение интегративного качества, а частный – конкретной компоненты. Определяется роль структурных исследований строительных материалов (строение, фазовый состав, связи, топология; динамические характеристики, стойкость в эксплуатационной среде, экономическая эффективность). Приведено практическое приложение указанного подхода для разработки композитов как сложных систем с использованием аналитических методов.

Список литературы

1. Прангишвили, И.В. Энтропийные и другие системные закономерности: вопросы управления сложными системами / И.В. Прангишвили. – М.: Наука, 2003. – 302 с.

2. Прангишвили, И.В. Системный подход и повышение эффективности управления / И.В. Прангишвили. – М.: Наука, 2005. – 422 с.

3. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Архитектура и строительство России. – 2020. – № 3. – С. 14.

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. Garkina, I. Analytical design of building materials/ I. Garkina, A. Danilov //Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.

6. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – Vol. 8, № 2. – P.25–32.

7. Данилов, А.М. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 168 с.

References

1. Prangishvili, I.V. Entropy and other system laws: Issues in managing complex systems / I.V. Prangishvili. – M.: Science, 2003. – 302 p.

2. Prangishvili, I.V. System approach and increasing management efficiency / I.V. Prangishvili. – M.: Science, 2005. – 422 p.

3. Korolev, E.V. Prospects for the development of construction materials science / E.V. Korolev // Architecture and construction of Russia. – 2020. – № 3. – P. 14.

4. Budylina, E.A. Systematic research in materials science / E.A. Budylina, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – №4 (49). – P. 48–53.

5. Garkina, I. Analytical design of building materials/ I. Garkina, A. Danilov //Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.

6. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – Vol. 8, № 2. – P.25–32.

7. Danilov, A.M. Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina. – Penza: PGUAS, 2014. – 168 p.

УДК 691 DOI 10.54734/20722958_2024_3_26

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

Романенко Игорь Иванович,
кандидат технических наук,
зав. кафедрой «Механизация и автоматизация производства»
E-mail: miap@pguas.ru

Фадин Алексей Ильич,
аспирант
E-mail: miap@pguas.ru

Петровнина Ирина Николаевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизация и автоматизация производства»
E-mail: irisha-vas@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

Romanenko Igor Ivanovich,
Candidate of Sciences,
Head of the Department «Mechanization and Automation of Production»
E-mail: miap@pguas.ru

Fadin Aleksey Ilyich,
Graduate student
E-mail: miap@pguas.ru

Petrovnina Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Mechanization and Automation of Production»
E-mail: irisha-vas@yandex.ru

КОМПОЗИЦИОННОЕ ВЯЖУЩЕЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В ЗАВОДСКИХ УСЛОВИЯХ

И.И. Романенко, А.И. Фадин, И.Н. Петровнина

Исследованы прочностные свойства композиционного вяжущего в котором клинкерный фонд заменен молотым доменным граншлаком на 40 %. Выявлено влияние термического воздействия на бетоны с целью получения ранней прочности 70-75 % от проектного значения. Установлены оптимальные значения температуры изотермического прогрева бетона, продолжительности изотермии, изучена кинетика набора прочности от 1 суток до 28 суток. Исследована коррозионная стойкость стальной арматуры (пластин) в бетонах на основе композиционного вяжущего при хранении в агрессивных 5 % водных растворах NaCl и Na_2SO_4; установлено, что она выше, чем у бетонов на основе портландцемента, за счет улучшения структуры матрицы вяжущего. Экспериментальные испытания показали, что процессом коррозии арматуры в бетонах можно управлять с помощью создания композиционных вяжущих на основе металлургических шлаков.

Ключевые слова: портландцемент, композиционное вяжущее, молотый шлак, бетоны, оптимизация структуры, температура изотермии, кинетика набора прочности, коррозия арматуры

COMPOSITE BINDER FOR PRODUCTION OF REINFORCED CONCRETE PRODUCTS IN FACTORY CONDITIONS

I.I. Romanenko, A.I. Fadin, I.N. Petrovnina

The strength properties of a composite binder in which the clinker stock is replaced by ground granulated blast furnace slag by 40 % have been studied. The influence of thermal effects on concrete has been revealed in order to obtain an early strength of 70-75 % of the design value. The optimal values of the temperature of isothermal heating of concrete and the duration of isothermia are established, and the kinetics of strength gain from 1 day to 28 days is also studied. The corrosion resistance of steel reinforcement (plates) in concrete based on a composite binder when stored in aggressive 5 % aqueous NaCl and Na_2SO_4 solutions and has been studied. It has been established that it is higher than that of concrete based on Portland cement due to the improvement of the structure of the binder matrix. Experimental tests have shown that the process of corrosion of reinforcement in concrete can be controlled by creating composite binders based on metallurgical slag.

Keywords: portland cement, composite binder, ground slag, concrete, structure optimization, isothermal temperature, strength gain kinetics, reinforcement corrosion

Введение. Для современного строительства портландцемент является основным материалом, и для его производства требуется большое количество различных ингредиентов, а это связано с нанесением экологического ущерба природной среде из-за технологических операций при производстве вяжущего (выброс углекислого газа в атмосферу, разрушение природного ландшафта, эрозия почв). Перспективными вяжущими являются вяжущее низкой водопотребности (ВНВ), тонкомолотые цементы, высоконаполненные ингредиентами портландцементы (при совместном помоле).

На Липецком цементном заводе применяются гранулированные доменные шлаки в качестве сырьевого компонента для производства шлакопортландцемента [1…3]. Такие цементы нормального твердения с содержанием шлака 35 % (тип III) эффективно использовать для производства пропаренных железобетонных изделий в строительной индустрией. Однако большую долю потребляемого вяжущего в стране составляют цементы типа I [4].

В то же время использование доменных шлаков в цементной промышленности целесообразно внедрять в регионах их получения (Липецк, Челябинск, Магнитогорск, Магнитогорск, Ижевск), так как снижаются транспортные расходы и совершенствуются логистические цепочки. Минералогический состав цементов типа III характеризуется большим количеством минералов C_3S, C_3A и SO_3 по сравнению с цементами типа I, что обеспечивает ранний набор прочности [5…6]. На предприятиях строительной индустрии для повышения производительности и увеличения выпуска железобетонных изделий применяется термовлажностная обработка (ТВО), которая способствует ускоренной гидратации клинкерного фонда, вяжущего в бетонах, что позволяет бетону достичь заданного уровня прочности при сжатии за ограниченное время. В строительной индустрии при производстве элементов сборного железобетона широко применяются цементы типа I для повышения производительности производственных линий и получения изделий с различным эстетическим видом [7…9]. Использование минеральных добавок, таких, как летучая зола, измельченный гранулированный доменный шлак, кремнезем, существенно повышает прочность и долговечность бетонных конструкций при воздействии на них агрессивных сред [8].

Современный взгляд на экономику и экологию способствуют расширению исследований по применению металлургических шлаков в качестве тонкомолотых наполнителей цементной матрицы. Примером может служить высоконаполненное вяжущее на основе портландцемента и молотого доменного граншлака.

Повышение оборачиваемости форм на заводах строительной индустрии достигается за счет ТВО изделий. Стандартный режим в зависимости от технологии, марки и вида изделия, составляет: выдержка : нагрев : изотермическая выдержка : снижение температуры (охлаждение) = 3 : 3 : (12 – 18) : 3, Общее время ТВО не превышает 24 часов. Температура изотермической выдержки составляет 80 ^{0}С. Отпускная прочность бетона на сжатие – 70 % от проектного значения.

При наличии в композиционном вяжущем молотого доменного граншлака возникает вопрос о поведении арматуры при взаимодействии бетонных конструкций с водными растворами NaCl и Na_2SO_4. Как известно, эти растворы являются наиболее агрессивными для арматуры в железобетонных конструкциях.

Материалы и методики проведения исследований. Для исследований использовали портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н и композиционное вяжущее с удельной поверхностью 3800 см^2/г, состоящее из портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н и молотого доменного граншлака и измельченное в шаровой керамической мельнице. Составляется композиция из портландцемента 60 % и 40 % молотого доменного граншлака, которая повторно измельчалась в шаровой мельнице до удельной поверхности 5009 см^2/г. Химический состав полученного композиционного вяжущего представлен в табл. 1.

Песок Сурский с модулем крупности $M_{кр}$=1,8, истинная плотность 2,61 г/см^3. Щебень гранитный (ОАО «Павловскгранит») фракции 5–10 мм (мытый), прочность 1200 кг/см^2, истинная плотность 2,6 г/см^3. Суперпластификатор Кратасол ПФМ ООО «Пигмент» – дозировка 1,0 % от массы вяжущего. Вода затворения питьевая. Осадка конуса бетонной смеси 16–18 см.

Таблица 1

Химический и минералогический состав композиционного вяжущего

Химический состав, %						Минералогический состав, %						δ, г/см^3	Удельная поверхность, см^2/г
CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	MgO	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	K_2O	SO_3		
51,43	26,07	7,8	2,83	0,93	4,98	66,81	10,97	5,94	12,48	0,6	2,81	3,1	5009

Подборы равноподвижных составов бетонных смесей представлены для марок М300, М400 и М500 в табл. 2.

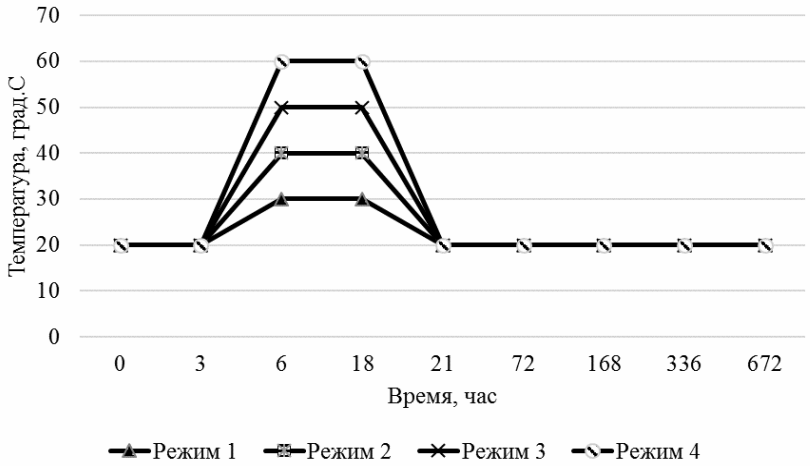
Таблица 2

Подборы бетонных смесей на марки М300, М400, М500

№	Индекс	Расход ингредиентов, кг/м^3					В/Ц	Проектная марка	В/П+Щ
		Вяжущее (В)	Песок (П)	Щебень (Щ)	Вода (H_2O)	Суперпластификатор (С)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	А30	355	660	1060	176	3,55	0,49	М300	0,21
2	В40	435	610	1042	176	4,35	0,4	М400	0,26
3	С50	510	569	1025	176	5,1	0,31	М500	0,32

Бетонная смесь готовилась в лабораторном бетоносмесителе емкостью 80 л, смесь уплотнялась в формах-двойках на виброплощадке. Образцы формовались в формах в виде кубиков размером 100×100×100 мм с последующей изоляцией полиэтиленовой пленкой от потери влаги при твердении; автоматизированное регулирование температурно-влажностного режима по заданной программе проводилось в напольной камере ТВО; твердение осуществлялось в камере с термостатированием. Перед процессом ТВО выдержка в формах при T=(20 ± 5) ^{0}С составляла 3 часа.

На рисунке представлены термограммы процессов ТВО контрольных образцов бетона. Режим ТВО: 3+12+3 при температуре изотермической выдержки 30, 40, 50, 60 ^{0}С. Скорость подъема температуры: 3,3 ^{0}С/ч, 6,7 ^{0}С/ч, 10 ^{0}С/ч и 13,3 ^{0}С/ч соответственно с 20 ^{0}С до значений, установленных программой испытания. Прочность образцов на сжатие оценивали в возрасте 1 суток (24 ч), 3 суток (72 ч), 7 суток (168 ч), 14 суток (336 ч) и 28 суток (672 ч).



Термограммы процессов ТВО при температуре изотермической выдержки:
режим 1 – 30 ^{0}С; режим 2 – 40 ^{0}С; режим 3 – 50 ^{0}С; режим 4 – 60 ^{0}С

Коррозионная стойкость арматуры в бетонах исследовалась на призмах 40 × 40 × 160 мм, помещенных в агрессивную среду (5 % растворы NaCl и Na_2SO_4). Образцы изготавливались из бетонов, составы которых представлены в табл. 2. Толщина защитного слоя для арматуры принималась 20 мм.

Пластинки (арматура) из стали Ст3 размером 2 × 15 × 100 мм очищались от ржавчины, полировались и обезжиривались ацетоном. Перед укладкой в бетон образцы взвешивались с точностью до 0,01 г. После ТВО бетонные образцы хранились в камере нормального твердения. В возрасте 28 суток образцы бетонов подвергали попеременному увлажнению и высушиванию (4 часа – увлажнение, 8 часов – сушка при температуре 50°С и 12 часов – стабилизация на воздухе). Через 6, 9, 12 месяцев испытаний образцы бетона подвергались разрушению. Пластины очищали от ржавчины, промывали водой, вытирали и взвешивали на аналитических весах. По потерям массы и площади повреждения рассчитывали коррозию арматуры.

$$K_a = \frac{P_1 - P}{S},$$

где K_a – потеря массы, г/м²; P_1 – масса металлического образца до помещения его в бетон, г; P – масса металлического образца после извлечения из бетона, г; S – площадь поверхности образца, м².

Цель исследования – определить кинетику набора прочности бетоном на композиционном вяжущем (содержание молотого граншлака 40 %) при минимальном температурном режиме твердения и оценить коррозионную стойкость арматуры, помещенной в бетонные образцы.

Испытания на прочность при сжатии проводили на гидравлическом прессе с электронным фиксированием показателей и регулируемой скоростью нагружения. На каждый состав изготавливалось по 60 образцов-кубиков.

При анализе полученных данных (табл. 3) было установлено, что все составы при различных температурах изотермической выдержки в камере пропаривания через 72 часа имеют прочность 70 % от проектного значения.

Таблица 3

Кинетика набора прочности образцов бетона на композиционном вяжущем

№	Индекс	$T_{изотер}$, ^{0}C	Средняя прочность при сжатии серии из 3 образцов, МПа, в возрасте, час / %, от проектного значения прочности				
			24 / %	72 / %	168 / %	336 / %	672 / %
1/1	А30	30	15,1/50	21,5/71,7	28,4/96,0	32,6/108,7	33,0/110,0
2/1	В40	30	21,8/54,4	28,3/70,8	36,9/92,25	41,4/103,5	42,5/106,3
3/1	С50	30	24,6/49,2	32,7/65,4	41,3/82,6	52,3/104,6	53,2/106,4
1/2	А30	40	16,6/55,3	23,8/79,3	29,8/99,3	36,6/122,0	36,8/122,7
2/2	В40	40	23,7/59,3	29,0/72,5	37,7/94,3	41,9/104,8	44,2/110,5
3/3	С50	40	28,1/56,2	37,8/75,0	49,2/98,4	53,9/134,8	54,5/109,0
1/3	А30	50	12,6/42,0	20,9/69,7	30,2/100,7	35,0/116,7	36,1/120,3
2/3	В40	50	24,9/62,3	30,1/75,3	42,9/107,3	44,6/111,5	46,4/116,0
3/3	С50	50	29,9/59,8	38,6/77,2	51,7/103,4	54,4/108,8	56,1/112,2
1/4	А30	60	15,6/52,0	23,0/76,6	32,6/108,7	34,6/115,3	34,8/116,0
2/4	В40	60	25,9/64,8	31,5/78,8	43,8/109,5	44,9/112,3	47,7/119,3
3/4	С50	60	30,2/60,4	40,4/80,8	53,8/107,6	56,3/112,6	57,9/115,8

Составы А30, В40 и С50 при температуре изотермической выдержки 50 ^{0}C и 60 ^{0}C в возрасте 168 часов имеют прочность 100–109 %. Составы А30, В40 и С50 при температуре изотермической выдержки 30 ^{0}C и 40 ^{0}C достигают прочности 100–122 % в возрасте 336 часов.

Высокие темпы набора прочности в ранние сроки твердения характерны для температуры изотермического прогрева 50 ^{0}C и 60 ^{0}C. Исследования показали, что все составы бетонов (А30, В40, С50) при различных режимах ТВО в более поздней стадии твердения обладают схожими темпами набора прочности.

Результаты испытания кубиков на прочность, представленные в табл. 3, подтверждают, что температура отверждения оказывает существенное влияние на скорость гидратации композиционного вяжущего и приводит к перекрестному эффекту, обычно наблюдаемому в бетонах, приготовленных на портландцементе типа I.

С увеличением температуры изотермической обработки цементный камень переходит в кристаллический материал, обладающий прочностью и высокой плотностью, с неполностью гидратированными зернами цемента, наличием множества пор, заполненных воздухом и химически несвязанной водой.

Результаты исследования коррозионной стойкости арматурных стержней и пластин представлены в табл. 4. Следы коррозии металла в возрасте 6 и 12 месяцев в бетонах с использованием липецкого шлака не обнаружены при хранении в средах с H_2O, NaCl и Na_2SO_4. Металл имел серебристый цвет. В возрасте 24 месяцев на всех образцах при хранении в 5 % растворе Na_2SO_4 наблюдалось образование питинговой коррозии металла (арматура покрыта отдельными язвами).

Таблица 4

Потери массы арматуры в бетоне на композиционном вяжущем при хранении в воде и 5 % растворах NaCl и Na_2SO_4

Состав	Потери массы арматуры в бетоне во времени, в воде и растворах, г/м²								
	H_2O			5 % раствор NaCl			5 % раствор Na_2SO_4		
	6 мес.	12 мес.	24 мес.	6 мес.	12 мес.	24 мес.	6 мес.	12 мес.	24 мес.
Портландцемент	0,48	0,56	0,69	0,41	0,49	0,58	2,90	4,44	6,00
1/4 A30	0,46	0,59	0,72	0,49	0,62	0,79	2,91	3,75	4,91
2/4 B40	0,51	0,61	0,82	0,47	0,60	0,79	3,31	3,90	5,15
3/4 C50	0,39	0,50	0,65	0,35	0,48	0,54	2,20	3,31	3,92

Наибольшая потеря по массе у контрольного состава бетона М500, приготовленного на портландцементе, что превышает потери масс арматуры в бетонах на композиционном вяжущем на 14,2–34,7 %.

Выводы

1. Применение композиционного вяжущего с 40 % содержанием молотого доменного граншлака для изготовления сборных железобетонных изделий методом ТВО в заводских условиях позволяет сократить расход топлива на термовлажностную обработку изделий и выбросы углекислого газа в атмосферу за счет использования малоклинкерного вяжущего, а также достичь раннего повышения прочности до отпускных значений.
2. Кинетика набора прочности бетонов на композиционном вяжущем соответствует требованиям к бетонам, изготавливаемым на портландцементе типа I.
3. Бетоны на композиционном вяжущем при содержании в вяжущем 40 % молотого доменного граншлака имеют прочность в возрасте 7, 14 и 28 суток, равную прочности бетона марки ЦЕМ I 42,5 Н, что связано с улучшением микроструктуры шлакобетонов и позволяет снизить интенсивность коррозии арматуры в бетонах по сравнению с контрольным составом на 14,2 – 34,7 % (по потере массы металла).
4. Скорость набора прочности растет быстрее при более высоких $T_{изотерм}$ на ранней стадии отверждения, но впоследствии темпы набора прочности снижаются, причем на более поздней стадии быстрее. Оптимальное время изотермической выдержки 60 ^{0}C.

Список литературы

1. Yung-Chin Ding. Study on the treatment of BOF slag to replace fine aggregate in concrete / Yung-Chin Ding, Ta-Wui Cheng, Ping-Chun Liu, and Wei-Hao Lee // Construction and Building Materials. – 2017. – 146. – P. 644–651.
2. Zheng J., Sun X., Guo L., Zhang S., Chen J. Construction and Building Materials. – 2019. – 203. – P.111–119. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.047.

3. Samchenko, S. International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining / S. Samchenko, I. Kozlova, O. Zemskova // Ecology Management, SGEM. – 2018. – 18(6.3). – P. 437–444. – DOI: 10.5593/sgem2018/6.3/S26.057.

4. Bazhenov, Y. The use of finely ground slag in portland cement with mineral additives / Y. Bazhenov, I. Kozlova, K. Nechaev, A. Kryuchkova // E3S Web of Conferences 91, 02044 (2019) TPACEE-2018. – URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf /20199102044.

5. Suresh, D. Ground Granulated Blast Slag In Concrete – A Review / D. Suresh, K. Nagaraju // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2015. – 12(4). – P. 76–82.

6. Капустин, А. Состав и свойства композиционного цемента с добавка золошлаковой смеси ТЭЦ / А. Капустин, И. Семериков // Вестник ЮУрГУ. – 2011. – № 16. – С. 38–40.

7. Киюшина, О. Тенденции и перспективы развития монолитного строительства в России / О. Киюшина // Цемент и его применение. – 2018. – С. 28–29.

8. Fangjie, K. Influence of design parameters on the microstructure of the steel-concrete interface in reinforced concrete / K. Fangjie, K. Li, B. Hassan, B. Ma // Cement concrete. – 2019. – Res. 119. – P.1–10. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.01.005.

9. Zheng, X. Determination of corrosion rate of steel bars in concrete based on interfacial porosity / X. Zheng, X. Yang, X. Sun // Front. Mater. – 2020. – 7:573193. – DOI: 10.3389/fmats.2020.573193.

10. Романенко, И.И. Строительные материалы на основе активированного сталеплавильного шлака / И.И. Романенко, А.И. Фадин //Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №1(54). – С. 85–93.

References

1. Yung-Chin Ding. Study on the treatment of BOF slag to replace fine aggregate in concrete / Yung-Chin Ding, Ta-Wui Cheng, Ping-Chun Liu, and Wei-Hao Lee // Construction and Building Materials. – 2017. – 146. – P. 644–651.

2. Zheng J., Sun X., Guo L., Zhang S., Chen J. Construction and Building Materials. – 2019. – 203. – P.111–119. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.047.

3. Samchenko, S. International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining / S. Samchenko, I. Kozlova, O. Zemskova // Ecology Management, SGEM. – 2018. – 18(6.3). – P. 437–444. – DOI: 10.5593/sgem2018/6.3/S26.057.

4. Bazhenov, Y. The use of finely ground slag in portland cement with mineral additives / Y. Bazhenov, I. Kozlova, K. Nechaev, A. Kryuchkova // E3S Web of Conferences 91, 02044 (2019) TPACEE-2018. – URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf /20199102044.

5. Suresh, D. Ground Granulated Blast Slag In Concrete – A Review / D. Suresh, K. Nagaraju // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2015. – 12(4). – P. 76–82.

6. Kapustin, A. Composition and properties of composite cement with the addition of ash and slag mixture of CHP / A. Kapustin, I. Semerikov //Vestnik YuUrGU. – 2011. – № 16. – P. 38–40.

7. Kiyushina, O. Trends and prospects for the development of monolithic construction in Russia // Cement and its application. – 2018. – P. 28–29.

8. Fangjie, K. Influence of design parameters on the microstructure of the steel-concrete interface in reinforced concrete / K. Fangjie, K. Li, B. Hassan, B. Ma // Cement concrete. – 2019. – Res. 119. – P.1–10. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.01.005.

9. Zheng, X. Determination of corrosion rate of steel bars in concrete based on interfacial porosity / X. Zheng, X. Yang, X. Sun // Front. Mater. – 2020. – 7:573193. – DOI: 10.3389/fmats.2020.573193.

10. Romanenko, I.I. Construction materials based on activated steelmaking slag / I.I. Romanenko, A.I. Fadin // Regional architecture and engineering. – 2023. – №1(54). – P. 85–93.

УДК 69 DOI 10.54734/20722958_2024_3_32

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

Очкина Наталья Александровна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Физика и химия»
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru

Шмарова Татьяна Сергеевна,
старший преподаватель кафедры «Физика и химия»
E-mail: shmarovats@yandex.ru

Очкин Игорь Анатольевич,
магистрант
E-mail: ochkin@ogroup.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

Ochkina Natalia Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department «Physics and Chemistry»
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru

Shmarova Tatyana Sergeevna,
Senior Lecturer of the Department «Physics and Chemistry»
E-mail: shmarovats@yandex.ru

Ochkin Igor' Anatol'yevich,
Master's student
E-mail: ochkin@ogroup.ru

РАДИАЦИОННЫЙ РАЗОГРЕВ И ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ВЫСОКОПЛОТНЫХ КОМПОЗИТОВ ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Н.А. Очкина, Т.С. Шмарова, И.А. Очкин

Определены зависимости температуры радиационного разогрева конструкционных элементов защиты от ионизирующих излучений, изготовленной из композита на основе глиноземистого цемента с высокоплотным заполнителем (полиминеральный отход стекольной промышленности), от активности источника, расстояния от него до слоя защиты, энергии квантов излучения, времени облучения, а также от свойств материала защиты. Дается распределение температур по толщине конструкции защиты. Рассчитана максимальная температура нагрева. Показано, что исследуемые композиты под действием ионизирующих излучений разогреваются незначительно (на 5…8°С). Экспериментально определено влияние повышенных температур на прочность образцов: высокоплотные композиты на основе глиноземистого цемента и полиминерального отхода стекольной промышленности характеризуются большей температурной стойкостью, чем бетоны на глиноземистом цементе и гематитовом, а также магнетитовом заполнителях.

Ключевые слова: композит, глиноземистый цемент, высокоплотный заполнитель, ионизирующее излучение, конструкция защиты, радиационный разогрев, температура, термостойкость

RADIATION HEATING AND THERMAL STABILITY OF HIGH-DENSITY COMPOSITES FOR SPECIAL PURPOSES

N.A. Ochkina, T.S. Shmarova, I.A. Ochkin

The dependences of the temperature of radiation heating of structural elements of protection against ionizing radiation, made of a composite based on alumina cement with high-density filler (polymineral waste from the glass industry), on the activity of the source, the distance from it to the protection layer, the energy of radiation quanta, irradiation time, as well as on properties of the protection material are determined. The temperature distribution across the thickness of the protection structure is given. The maximum heating temperature is calculated. It is shown that the studied composites heat up slightly (by 5...8°C) under the influence of ionizing radiation. The effect of elevated temperatures on the strength of samples has been experimentally determined: high-density composites based on alumina cement and polymineral waste from the glass industry are characterized by greater temperature resistance than concretes based on alumina cement and hematite and magnetite fillers.

Keywords: composite, alumina cement, high-density aggregate, ionizing radiation, protection design, radiation heating, temperature, heat resistance

Вследствие поглощения значительная часть энергии ионизирующего излучения превращается в теплоту, которая выделяется в основном во внутреннем слое биологической защиты и повышает её температуру. При отсутствии искусственного охлаждения температура конструктивных элементов защиты возрастает до тех пор, пока количество теплоты, отданное при охлаждении в окружающую среду, не уравновесит количество подводимой энергии. При этом возможно разрушение конструкций, изготовленных из недостаточно термостойких материалов, как от чрезмерного или неравномерного нагревания, так и вследствие неравномерности теплового расширения материалов. Наиболее распространенным материалом для биологической защиты от излучений является обычный минеральный, а в отдельных случаях – специальный тяжелый бетон. Наряду с положительными свойствами (высокая плотность, содержание определенного количества водорода в химически связанной воде и сравнительно низкая стоимость) у бетона есть существенный недостаток – низкая теплопроводность, что затрудняет отвод теплоты от него. Поэтому при сооружении бетонной защиты от излучений большое значение имеет изменение механических свойств бетона под действием температуры.

Степень радиационного разогрева зависит от поглощенной дозы излучения, которая, в свою очередь, определяется активностью источника, расстоянием от него до слоя защиты, величиной энергии квантов излучения, а также зависит от теплофизических и радиационно-защитных свойств материала, времени облучения, теплового режима работы конструкции защиты и т.д.

Исходя из актуальности проблеме радиационного разогрева бетонов посвящено значительное количество работ [1…6]. Так, в [1] предложена модель для определения зависимости температуры разогрева от индивидуальных характеристик источника излучения, а также от рецептурных и эксплуатационных свойств материала защиты; дается формула для расчета температуры материала защитного экрана в любой момент времени

$$T = T_c + \frac{A_0 e_0 \left(1 - e^{-\mu x}\right)}{4\pi R^2 \alpha} \left(1 - e^{-\frac{\alpha}{c_м \gamma x}\tau}\right), \qquad (1)$$

где T_c – температура окружающей среды; R – расстояние между слоем защиты и источником; A_o – активность источника; e_o – усредненное значение энергии гамма квантов; μ – коэффициент линейного ослабления гамма-излучения материалом защитного слоя; x – толщина защитного слоя; γ – средняя плотность материала защиты; $c_м$ – молярная теплоемкость материала защиты; α – коэффициент теплоотдачи; τ – время.

При прочих равных условиях наиболее важными факторами, определяющими величину радиационного разогрева материала, являются его молярная теплоемкость, средняя плотность и коэффициент теплоотдачи. Увеличение теплоемкости и средней плотности приводит к уменьшению скорости разогрева материала, а с увеличением значения коэффициента теплоотдачи уменьшается время достижения стационарной температуры. Отметим, что при $\tau \to \infty$ (стационарный режим) справедливо

$$T = T_c + \frac{A_0 e_0 \left(1 - e^{-\mu x}\right)}{4\pi R^2 \alpha}. \qquad (2)$$

Нами по (2) оценивалось влияние индивидуальных параметров источника ионизирующего излучения (энергия гамма-квантов, активность источника) и степени наполнения материала на величину радиационного разогрева высокоплотного композита на основе глиноземистого цемента (ГЦ), наполненного полиминеральным отходом стекольной промышленности (ПМО).

Расчетные зависимости температуры радиационного разогрева композита со степенью наполнения (ϑ_f = 0,66) от поглощенной дозы ионизирующего излучения и времени приводятся на рис. 1, 2.

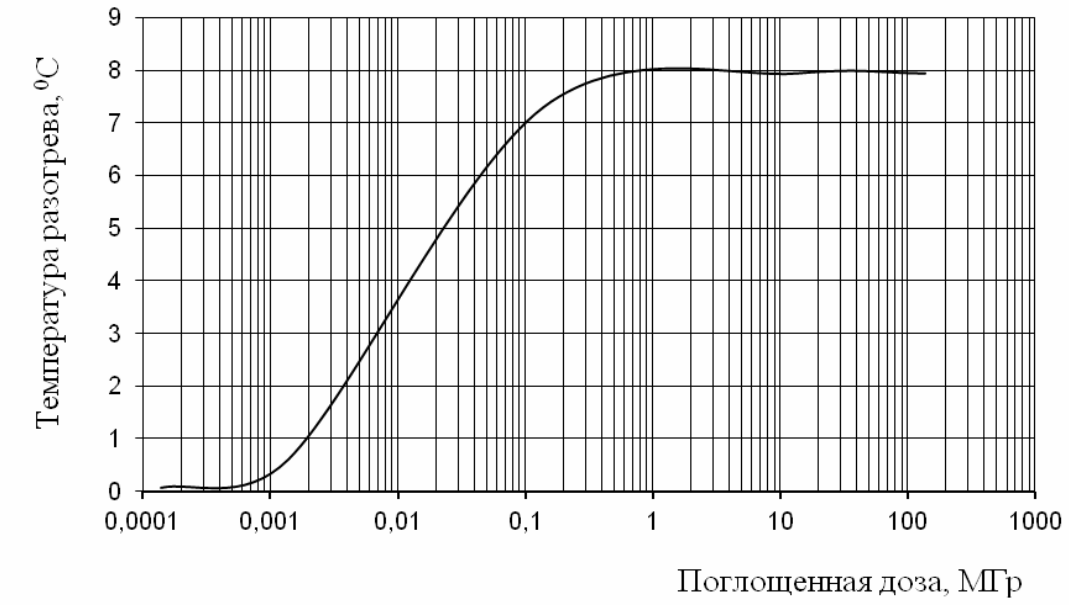


Рис. 1. Зависимость температуры разогрева от поглощенной дозы гамма-излучения ($\vartheta_f = 0{,}66$; $n = 2$; $e_0 = 1{,}25$ МэВ; $A_0 = 10^{15}$ Бк; $\alpha = 1$ Дж/(м^2·К); n – кратность ослабления ионизирующего излучения)

В течение первых 10^4 с (≈3 часов) облучения повышение температуры композита незначительно. Затем наблюдается постепенное заметное её возрастание. Поскольку температура разогрева при этом невелика, то нет опасности возникновения внутренних напряжений, способных привести к образованию микротрещин в структуре материала.

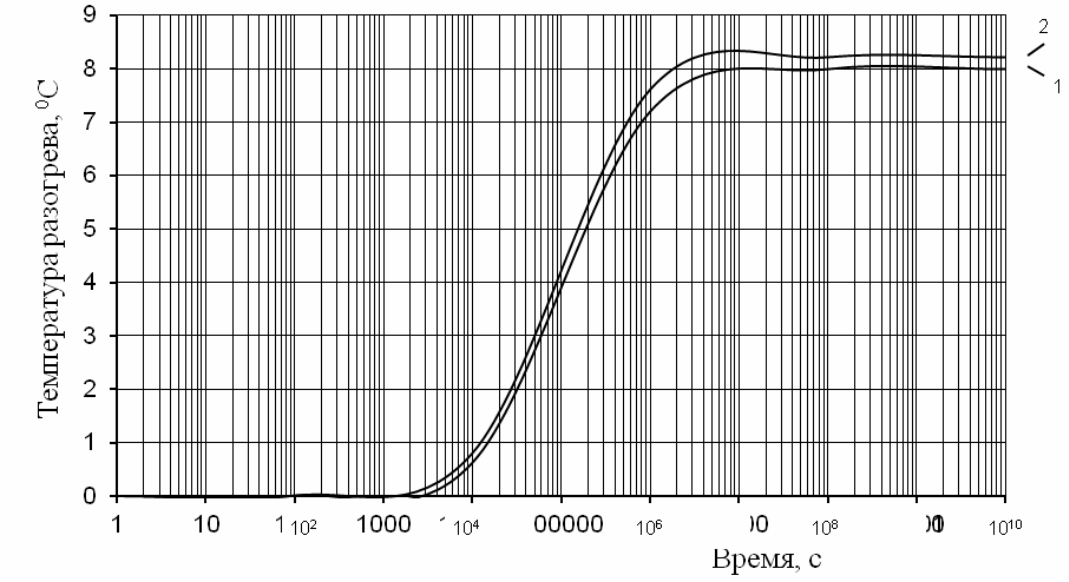


Рис. 2. Зависимость температуры разогрева от времени облучения:
1 – композит со степенью наполнения $\vartheta_f = 0{,}59$; 2 – $\vartheta_f = 0{,}66$

Через 10^7 с (≈0,32 года) облучения наблюдается стабилизация температурного поля, и дальнейшее облучение материала не приводит к повышению температуры. Увеличение степени наполнения, сопровождающееся незначительным ростом темпе-

ратуры разогрева, объясняется увеличением количества поглощенной энергии вследствие повышения плотности композита.

Значительное влияние на величину радиационного разогрева оказывает активность источника излучения (табл. 1): возможна регулировка радиационного разогрева тепловым режимом работы конструкции. Как видно из табл. 1, при активности источника более 10^{17} Бк необходимо вводить принудительное охлаждение конструкции.

Таблица 1

Влияние активности источника и коэффициента теплоотдачи на температуру разогрева

Активность источника, Бк	Температура разогрева, °С			
	Коэффициент теплоотдачи, Дж/(м^2·К)			
	1	5	10	50
10^{15}	3,52	1,56	0,80	0,16
10^{16}	35,22	15,63	7,95	1,59
10^{17}	352,19	156,29	79,48	15,92

Температура разогрева защитного экрана определяется не только величиной тепловыделения, но и в значительной степени зависит от теплопроводности, а также от величины коэффициента линейного ослабления гамма-излучения, поскольку радиационный разогрев является результатом поглощения энергии гамма-квантов, попавших в слой защиты [2…6].

Расчеты максимального значения температуры в защите, расстояния от поверхности защиты, подвергающейся воздействию излучения, до точки с максимальной температурой (в том числе для случая, когда конструкция защиты искусственно охлаждается, а разница температур её поверхностей равняется нулю), а также распределения температур по толщине конструкции защиты производились по формулам (3)–(8), предложенным В.Б. Дубровским:

$$T_{\text{макс}} = t_1 + \frac{fEI_0L}{\lambda}\left(1+\frac{L}{h}\ln C - C\right) + \frac{L}{h}\left(t_1 - t_2\right)\ln C,$$
$$C = \frac{L}{h}\left[1+\frac{\lambda}{fEI_0L}\left(t_1 - t_2\right)\right], \quad (3)$$

$$x_{\text{макс}} = -L\ln\left[\frac{L}{h}+\frac{\lambda}{fEI_0h}\left(t_1 - t_2\right)\right], \quad (4)$$

$$T_{\text{макс}} = t_1 + \frac{fEI_0L}{\lambda}\left(1+\frac{L}{h}\ln\frac{h}{L}-\frac{L}{h}\right), \quad (5)$$

$$x_{макс} = -L\ln\frac{h}{x}\ , \quad (6)$$

$$T\left(x\right) = t_1 + \frac{fEI_0L}{\lambda}\left(1-\frac{x}{h}-e^{-\mu x}\right)-\frac{x}{h}\left(t_1 - t_2\right), \quad (7)$$

При разности температур $\Delta t = t_1 - t_2 = 0$

$$T\left(x\right) = \frac{fEI_0L}{\lambda}\left(1-\frac{x}{h}-e^{-\mu x}\right). \quad (8)$$

Здесь t_1 и t_2 – соответственно температуры внутренней и наружной поверхности конструкции защиты; f – постоянный коэффициент, значение которого определяется для данных величин E и I_0; E и I_0 – средняя энергия и плотность потока излучения гамма-квантов; λ – коэффициент теплопроводности; L – длина релаксации; h – толщина защиты.

Оказалось (табл. 2), что максимальная температура радиационного разогрева композитов на основе ГЦ с различными заполнителями невелика. Для композитов на кварцевом песке наименьшее её значение можно объяснить более высокой теплопроводностью и небольшой величиной коэффициента линейного ослабления гамма-излучения. У композитов на ПМО максимальная температура разогрева в 7,2 раза больше, чем на кварцевом песке, и в 2,4 раза больше, чем у композитов с баритовым заполнителем. Композиты на ПМО имеют большую величину коэффициента линейного ослабления гамма-излучения и, следовательно, эффективнее поглощают падающее излучение, а также характеризуются меньшим значением коэффициента теплопроводности.

Таблица 2

Значения $x_{макс}$ и $T_{макс}$ защитных композитов с $\vartheta_f = 0{,}66$
(при $E = 6$ МэВ; $I_0 = 3{,}39 \cdot 10^9$ см$^{-2}$·с$^{-1}$; $f = 1{,}6 \cdot 10^{-13}$ Дж/МэВ; $h = 18$ см; $\Delta t = 0$)

№ состава	Вид заполнителя	λ, Вт/м·К	μ, см$^{-1}$	$x_{макс}$, см	$T_{макс}$, °С
1	ПМО	0,490	0,146	7,0	1,024
2	Барит	0,655	0,084	5,0	0,454
3	Кварцевый песок	0,865	0,072	4,0	0,144

Природа зависимости максимальной температуры разогрева от толщины слоя защиты для композитов на различных заполнителях имеет одинаковый характер (рис. 3). Повышение максимальной температуры разогрева при увеличении толщины защиты обусловлено увеличением количества поглощенной энергии гамма-излучения в защите большей толщины.

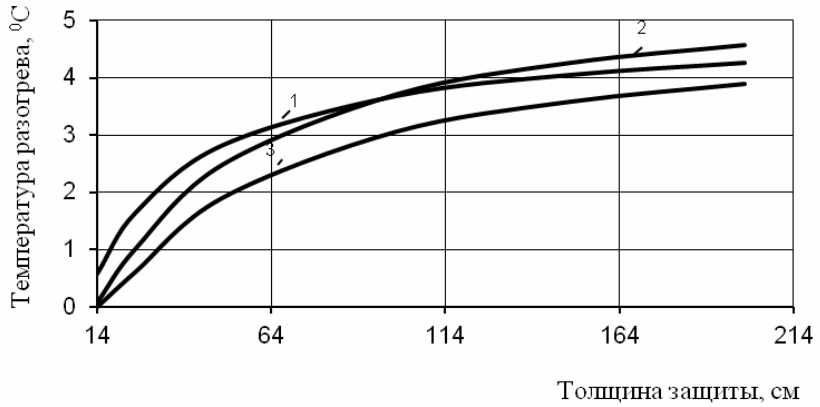


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры разогрева от толщины слоя защиты:
1 – композит на ПМО; 2 – на барите; 3 – на кварцевом песке

На рис. 4 показана зависимость относительного расстояния в защите от поверхности, подвергающейся воздействию излучения, до точки с максимальной температурой $x_{макс}$ от толщины защиты. При толщинах до 20 см у композита на ПМО точка с максимальной температурой расположена примерно на расстоянии 0,3…0,33h от поверхности экрана. У композитов с менее плотными заполнителями она находится ближе к внутренней поверхности экрана. При толщинах 25…50 см максимальный разогрев наблюдается на глубине, равной примерно 0,3…0,36h у всех композитов. При дальнейшем увеличении толщины защиты координаты точек максимального разогрева постепенно уменьшаются.

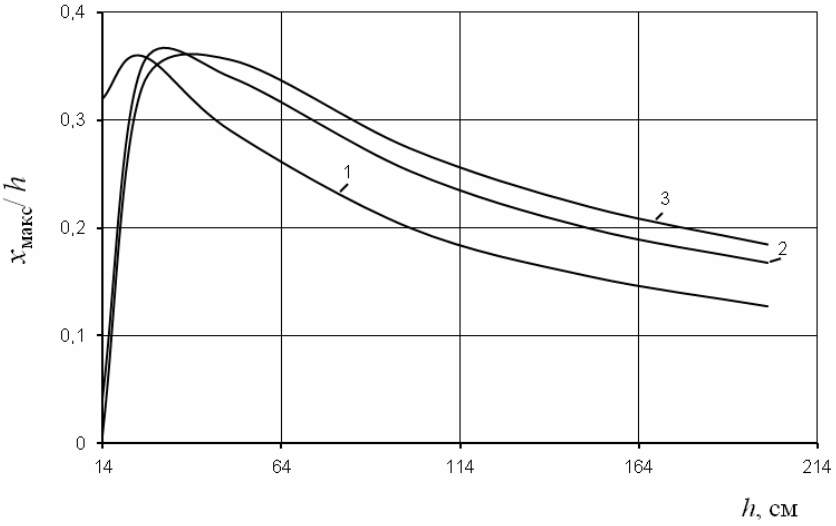


Рис. 4. Зависимость $x_{макс}/h$ от толщины экрана защиты:
1 – композит на ПМО; 2 – на барите; 3 – на кварцевом песке

Распределение температур в защите из композитов на различных заполнителях при одинаковой толщине защиты (рис. 5) имеет аналогичный характер. При одинаковой кратности ослабления излучения (разной толщине) меньше других разогревается защита из композита на ПМО, имеющая наименьшую толщину (рис. 6).

Рис. 5. Распределение температур в слое защиты:
1 – композит на ПМО (кратность ослабления n = 10);
2 – на барите (n = 4,5); 3 – на кварцевом песке (n = 3,7)

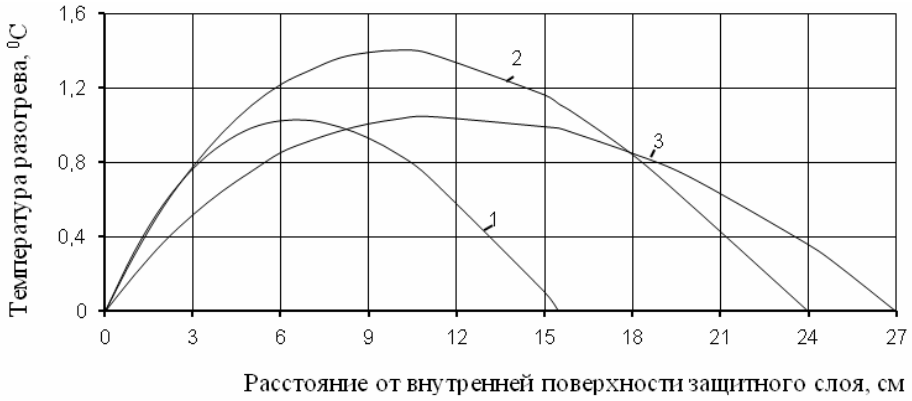


Рис. 6. Распределение температур в слое защиты:
1 – композит на ПМО; 2 – на барите; 3 – на кварцевом песке

Как видно, высокоплотные композиты на основе ГЦ с заполнителем ПМО под действием ионизирующих излучений разогреваются незначительно (на 5…8°С). Поэтому их можно рекомендовать для проведения срочных ремонтно-восстановительных работ зданий и сооружений, эксплуатируемых в районах с повышенным радиационным фоном. Практика выполнения таких работ показала, что материалы, применяемые для сооружения защит от ионизирующих излучений, должны обладать повышенной прочностью как в начальные сроки твердения (с целью сокращения продолжительности ремонта), так и в последующий период службы при повышенных температурах.

Термическая стойкость композита зависит от строения заполнителей, а также от химической стойкости других его составляющих (цементного камня, добавок), структура которых включает кристаллогидраты. Используемый в качестве заполнителя для исследуемых композитов ПМО имеет аморфное строение и обладает изотропностью термического расширения. Максимальная температура его эксплуатации равна 400°С (то есть термическую стойкость ПМО можно оценивать как вполне удовлетворительную). Исследование влияния повышенных температур на прочность цементного камня и композитов проводили на образцах естественного твердения с геометрическими размерами 3×3×3 см. Степень наполнения варьировалась от ϑ_f = 0,59 до ϑ_f= 0,66. Образцы в возрасте 7 сут подвергались сушке при 100…110°С до постоянной массы в течение 15 ч и последующему нагреву. Предел прочности при сжатии определяли после 4-часовой выдержки образцов при 200, 300, 400 и 600 °С.

Таблица 3

Изменение прочности цементного камня и высокоплотных композитов при нагреве

Состав	Предел прочности при сжатии, МПа						
	при 20 °С	после сушки при 100…110°С	после нагрева, температура нагрева, °С				
			200	300	400	500	600
Цементный камень	57	101	82	79	90	86	84
Композит со степенью наполнения ϑ_f= 0,59	54	80	73	41	39	–	–
Композит со степенью наполнения ϑ_f= 0,66	39	73	67	33	27	–	–

Как видно из табл. 3, цементный камень 7-суточного твердения после сушки при 100…110°С увеличивает прочность. При последующем нагреве до 300°С его прочность уменьшается. Затем при температуре 400°С наблюдается повышение прочности, а при дальнейшем нагревании до температуры 500…600°С – ее снижение. Характер изменения прочности композитов с разной степенью наполнения одинаков. Уменьшение прочности при нагреве в интервале температур 200…400°С, когда при этих же температурах прочность цементного камня увеличивалась, свидетельствует о нарушении прочности контактной зоны между цементным камнем и заполнителем при нагреве.

Прочность композитов с наполнителем ПМО при 300°С в среднем составляет 68 % от первоначальной прочности при 20°С. Для сравнения, бетоны с магнетитовым и гематитовым заполнителями менее термостойкие. При 300°С прочность бетонов на глиноземистом цементе с магнетитовым наполнителем составляет 64 % от исходной прочности R_0, в случае использования гематитового наполнителя – 56 % R_0 [1].

Список литературы

1. Королев, Е.В. Строительные материалы вариатропно-каркасной структуры: монография / Е.В. Королев, Ю.М. Баженов, В.А. Смирнов. – М.: МГСУ, 2011. – 304 с.

2. Данилов, А.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ, 2012. – 432 с.

3. Мухамедов, Н.Е. Определение режимов реакторных исследований радиационного разогрева материалов ядерной и термоядерной техники / Н.Е. Мухамедов, Г.А. Виктюк, Р.Е. Келсингазина [и др.] // Вестник ВКТУ. – 2020. – №4. – С. 167–179.

4. Горин, Н.В. Обработка результатов эксперимента по измерению температуры радиационного разогрева материалов излучением ИГР / И.В. Горин, Н.Р. Садыков, А.И. Ульянов [и др.] // Известия Челябинского научного центра. – 2002. – Вып. 4(17). – С. 21–27.

5. Сулейменов, Н.А. Влияние радиационного разогрева конструкционных материалов экспериментального устройства с конвертером нейтронов на их температурный режим / Н.А. Сулейменов, Н.Е. Мухамедов, В. М. Котов // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – № 4. – С. 61–68.

6. Бормотов, А.Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов / А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, Е.В. Королёв. – Пенза: Изд-во ПГТА, 2011. – 352 с.

References

1. Korolev, E.V. Building materials of varitropic frame structure: monograph / E.V. Korolev, Yu.M. Bazhenov, V.A. Smirnov. – M.: MGSU, 2011. – 304 p.

2. Danilov, A.M. System analysis in construction materials science: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: MGSU, 2012. – 432 p.

3. Mukhamedov, N.E. Determination of reactor research modes for radiation heating of materials of nuclear and thermonuclear technology / N.E. Mukhamedov, G.A. Viktyuk, R.E. Kelsingazina [etc.] // VKTU Bulletin. –2020. – No. 4. – P. 167–179.

4. Gorin, N.V. Processing the results of an experiment on measuring the temperature of radiation heating of materials by IGR radiation / I.V. Gorin, N.R. Sadykov, A.I. Ulyanov [etc.] // News of the Chelyabinsk Scientific Center. – 2002. – Vol. 4(17). – P. 21–27.

5. Suleimenov, N.A. The influence of radiation heating of structural materials of an experimental device with a neutron converter on their temperature regime / N.A. Suleimenov, N.E. Mukhamedov, V. M. Kotov // Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. – 2020. – No. 4. – P. 61–68.

6. Bormotov, A.N. Mathematical modeling and multicriteria synthesis of composite materials / A.N. Bormotov, I.A. Proshin, E.V. Korolev. – Penza: Publishing House PGTA, 2011. – 352 p.

УДК 691. 338.2 DOI 10.54734/20722958_2024_3_40

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
Россия, 115054, Москва,
Стремянный переулок, д.36
Зайцева Мария Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры международного бизнеса
E-mail: zajc@yandex.ru
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
и технология строительного производства»
E-mail: loganin@mai.ru
Куимова Елена Ивановна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: lena-kui@mail.ru

Russian University of Economics named after G.V. Plekhanova
Russia, 115054, Moscow, 36,
Stremyanny Pereulok
Zaytseva Maria Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «International Business of REU»
E-mail: zajc@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
Loganina Valentina Ivanovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Quality Management
and Construction Technologies»
E-mail: loganin@mai.ru
Kuimova Elena Ivanovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Mathematics and
Mathematical Modeling»
E-mail: lena-kui@mail.ru

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ С УЧЕТОМ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА

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

На примере производства сухих строительных смесей рассмотрено влияние регулирования технологического процесса производства на вероятность появления брака и затраты на его исправление. Рассчитаны риски поставщика и покупателя в зависимости от состояния производственного процесса. С учетом функции Тагучи рассчитаны потери поставщика. Предложено оценивать качество поставщика с учетом состояния технологического процесса производства и наличия процессов управления производством продукции и ее реализацией.

Ключевые слова: сухие строительные смеси, операционный контроль, качество, поставщик, закупки

ASSESSMENT OF PRODUCT QUALITY CONSIDERING THE STATE OF THE TECHNOLOGICAL PRODUCTION PROCESS

M.V. Zaitseva, V.I. Loganina, E.I. Kuimova

Using the example of dry building mixtures production, the influence of regulation of the production process on the probability of defects and the costs on correcting them is considered. The risks of the supplier and buyer are calculated depending on the state of the production process. Taking into account the Taguchi function, supplier losses were calculated. It is proposed to evaluate the quality of the supplier taking into account the state of the technological process of production and the presence of processes managing the production and sales of the product.

Keywords: dry construction mixtures, operational control, quality, supplier, procurement

Потенциал конкурентоспособности предприятия определяется в числе других факторов условиями его функционирования, в том числе надежностью и ритмичностью поставок материальных ресурсов. Любое нарушение качества, сроков и

объемов поставок строительных материалов может привести к задержкам в строительстве проектов, нанести ущерб репутации предприятия, привести к потере покупателей. Функция закупок строительных материалов призвана обеспечить управление поставками в условиях минимизации указанных рисков [1].

Закупочная деятельность предприятия строительной отрасли – это цикл, объединяющий процессы трех его основных этапов: для первого этапа характерны выявление и формализация потребности предприятия, работа с рынком по ее уточнению и оценке возможностей удовлетворения; на втором этапе проходит анализ рынка и проведение закупочной процедуры, нацеленной на определение источников поставок формализованной потребности; третий этап включает процессы управления контрактными обязательствами и взаимоотношениями с источниками поставок. Каждый из трех этапов закупочного цикла содержит характеристики потребности предприятия строительной отрасли, формализующие требования внутренних заинтересованных сторон, ожидания внешних заинтересованных сторон, возможности рынка и отдельных источников поставок. В ходе первого этапа закупочного цикла происходит накапливание данных о характеристиках потребности и трансформация их в критерии оценки источников поставок, которые используются и уточняются на втором этапе закупочного цикла. Для третьего этапа характерен пересмотр данных, накопленных на первом и втором этапах, в формат ключевых показателей эффективности, отражающих не только требования к закупаемому продукту и источнику поставок, но и обеспечивающих управление исполнением контрактных обязательств.

Исполнение контрактных обязательств ограничено периметром контракта и правового поля покупателя и источника поставок продукта. Диверсификация управления контрактными обязательствами проходит по следующим направлениям: стоимость, качество, безопасность, время [2], но не ограничивается ими, имеет глубокую детализацию и изменяется в зависимости от категории потребности, рынка, рисков [3]. Ключевые показатели демонстрируют уровень эффективности управления исполнением контрактных обязательств сторонами-участниками поставки продукта [4, 5]. Обобщенными ключевыми показателями эффективности являются количества принятых поставок из их общего числа по признаку соответствия требованиям контракта, нормативно-правовой документации, ожиданиям заинтересованных сторон (табл. 1). Каждому показателю присвоен маркер изменения, указывающий на динамику отслеживаемого показателя на определенном периоде или числе поставок: зеленым маркируется показатель в случае последовательного снижения числа поставок, не удовлетворяющих требованиям, желтый маркер используется в случае отсутствия изменений в числе поставок с нарушениями, а красный – при его повышении за исследуемый период или числе поставок [6, 7].

Как видно из табл. 1, ключевые показатели эффективности носят реакционный характер и фиксируют нарушения требований к продукту, но не нацелены на поиск и устранение причин данного нарушения.

Таблица 1

Обобщенные ключевые показатели эффективности управления качеством

Показатель	Целевое значение	Источник данных	Методика расчета	Маркер изменения
1	2	3	4	5
Число поставок за период, удовлетворяющих требованиям нормативной документации	95 %	Число поставок, не принятых покупателем ввиду несоответствия требованиям	Число поставок за вычетом числа поставок не принятых покупателем деленое на число поставок	Желтый
Число поставок за период, удовлетворяющих требованиям спецификации	97 %	Число поставок, не принятых покупателем ввиду несоответствия требованиям	Число поставок за вычетом числа поставок не принятых покупателем деленое на число поставок	Красный

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Число поставок за период, принятых без доработки	95 %	Число поставок, не принятых покупателем ввиду несоответствия требованиям	Число поставок за вычетом числа поставок не принятых покупателем деленое на число поставок	Зеленый

В целях снижения затрат, вызванных потерей качества продукта, практический интерес представляют подходы к управлению исполнением контрактных обязательств, нацеленные на выявление нарушений требований качества продукта до осуществления его поставки покупателю. Требуется анализировать ключевые показатели не только эффективности управления качеством продукта, но и процессов источника поставок, связанных прямо или косвенно с производством и реализацией продукта [8]. К данным процессам можно отнести: операционный процесс производства, управление запасами, управление финансовой устойчивостью и другие процессы, определяемые как способность источника поставок управлять собственными операциями, совокупностью связанных задач, результатом исполнения которых является поставка продукта [9, 10].

Качество продукции напрямую зависит от уровня организации системы контроля качества предприятий, которая включает в себя организацию входного контроля материалов и комплектующих, управление производственными процессами, контроль готовой продукции и другие не менее важные процессы, регламентированные стандартами на системы качества.

Рассмотрим процесс управления закупками на примере сухих строительных смесей (ССС) (ГОСТ 33083–2014 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ. Технические условия»). Приемка продукта осуществляется по показателям средней плотности, подвижности растворной смеси, прочности при сжатии, водопоглощения при капиллярном подсосе. Будем считать, что контролируемые параметры являются нормально распределенными случайными величинами с математическим ожиданием, совпадающим с номинальным значением и заданным средним квадратическим отклонением σ. Предельно допустимое отклонение от номинального значения ±3σ. При расчете вероятности соблюдения технологии предполагается, что показатели являются независимыми друг от друга.

Исходя из структурно-вероятностного анализа, схема получения ССС имеет следующий вид:

сырье с определенными свойствами → технология → ССС.

Введем обозначение: событие A – на выходе будет получено ССС; A_1 – обеспечиваются необходимые свойства сырья, A_2 – обеспечивается технология производства**;** A_3 – обеспечиваются необходимые свойства ССС.

$$A = A_1 A_2 A_3 . \quad (1)$$

Соответствующая составляющая A_i обеспечивает требуемый уровень качества с вероятностью $P(A_i)$. По теореме умножения в силу независимости событий A_i имеем:

$$P(A) = P(A_1)P(A_2)P(A_3) . \quad (2)$$

Была проведена оценка значений рисков поставщика α и покупателя β только при дозировании четырех видов компонентов ССС в ходе технологического процесса производства: цемент, песок, водоудерживающая добавка метилцеллюлоза и редиспергируемый порошок (операционный контроль). Для каждого из компонентов дозирования были приняты нормативные значения массы, верхняя и нижняя границы допуска значений каждого вида компонента, значение среднего арифметического и среднеквадратического отклонения, погрешность измерения [11].

Расчет рисков поставщика и покупателя проводился с применением формул Бородачева:

$$\alpha_i = \int_a^b f(U) \cdot \left[\int_{-\infty}^a f(Y)\,dX + \int_b^\infty f(Y)\,dX \right] dU;$$

$$\beta_i = \int_{-\infty}^a f(U) \cdot \left[\int_a^b f(Y)\,dX \right] dU + \int_b^\infty f(Y) \cdot \left[\int_a^b f(Y)\,dX \right] dU, \quad (3)$$

где $[a_1; b_1]$ – интервал погрешности y_i, если значения U_i находятся в интервале $[a; b]$; f – плотность гауссовского распределения вероятностей; i – функциональная характеристика.

Поскольку контролю подвергалось несколько компонентов числом k, то обобщенные значения рисков рассчитаны по формулам

$$\alpha = 1 - \prod_{i=1}^{k} (1 - \alpha_i), \quad (4)$$

$$\beta = 1 - \prod_{i=1}^{k} (1 - \beta_i). \quad (5)$$

В процессе расчета последовательно изменялись значения среднего арифметического функциональной характеристики и среднеквадратического отклонения, вычислялись значения рисков поставщика и покупателя при данных измененных значениях. На следующем этапе значения среднего арифметического функциональной характеристики и среднеквадратического отклонения были изменены одновременно. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Анализ полученных значений рисков свидетельствует, что риск потребителя только за счет вариаций дозирования может составлять до 0,0468 (4,68 %). В статистически стабильном и воспроизводимом технологическом процессе производства значение риска покупателя для продукта только за счет дозирования сырья не превышает 0,0062 (табл. 3).

Таблица 2

Значения рисков поставщика и покупателя в зависимости от состояния технологического процесса производства (операционный контроль-дозирование)

	Показатели, характеризующее состояние производства			
	Нормативное	Изменение значения среднего арифметического	Изменение значения СКО	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического
1	2	3	4	5
Вид сырья: цемент				
Граница допуска, кг	нижняя 15			
	верхняя 20			
Значения среднего арифметического, кг	17,5	16	17,5	16
СКО	0,83	0,83	0,95	0,95
Погрешность измерения, %	1 % (0,175)			
Риск поставщика α	0,0011	0,019	0,0025	0,019
Риск покупателя β	0,0005	0,014	0,0013	0,015

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Вид сырья: песок				
Граница допуска, кг	нижняя 65			
	верхняя 85			
Значения среднего арифметического, кг	75	70	75	70
СКО	3,3	3,3	4	4
Погрешность измерения, %	2 % (1,5)			
Риск поставщика α	0,004	0,034	0,0099	0,036
Риск покупателя β	0,0007	0,015	0,0031	0,02
Вид сырья: метилцеллюлоза				
Граница допуска, кг	нижняя 0,07			
	верхняя 0,15			
Значения среднего арифметического, кг	0,11	0,11	0,08	1,1
СКО	0,0133	0,02	0,02	0,33
Погрешность измерения, %	1 % (0,0011)			
Риск поставщика α	0,0003	0,01	0,0025	0,0077
Риск покупателя β	0,00005	0,0095	0,0006	0,0075
Вид сырья: редиспергируемый порошок				
Граница допуска, кг	нижняя 0,7			
	верхняя 1,5			
Значения среднего арифметического, кг	1,2	1,1	1,2	1,1
СКО	0,33	0,5	0,5	0,33
Погрешность измерения, %	1 % (0,011)			
Риск поставщика α	0,0052	0,0053	0,0051	0,0051
Риск покупателя β	0,0049	0,005	0,005	0,0049

Таблица 3

Риски в зависимости от состояния технологического процесса производства (операционный контроль)

Показатели, характеризующее состояние производства	Риск поставщика α	Риск покупателя β
Нормативное	0,0107	0,0062
Изменение значения среднего арифметического	0,0668	0,0429
Изменение значения СКО	0,02003	0,0101
Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического	0,0664	0,0468

Таким образом, только вариации дозирования компонентов ССС могут способствовать появлению брака и, следовательно, неисполнения контрактных обязательств [12].

Были рассчитаны затраты, вызванные потерей качества продукции. Согласно функции потерь Тагути [13] каждая единица поставки, выходящая за рамки требований, формирует затраты для участников поставки, нацеленные на устранение потерь в качестве. Данные затраты, вызванные потерей качества продукта, прямо пропорциональны квадрату разницы номинального значения и значения функциональной харак-

теристики продукта с поправкой на постоянную потерь. Для объекта исследования – легкого отделочного раствора, имеющего значение плотности не ниже 1300 кг/м^3 в рамках классификации ГОСТ 33083–2014 – были рассчитаны затраты на партию стоимостью 200 000 рублей согласно функции Тагути:

$$L(x) = R(x-T)^2, \quad (6)$$

где L – затраты, выраженные в денежных единицах; x – значение функциональной характеристики; R – постоянная потерь; T – номинальное значение.

Исходя из условий типового контракта на поставку исследуемого продукта, была определена величина штрафа, выплачиваемого поставщиком покупателю в случае нарушения требований качества партии продукта. Величина штрафа составляет два процента от общей стоимости партии или 40 000 рублей. Используя формулу (6), для каждого из указанных показателей была рассчитана постоянная потерь и затраты, которые с последующим усреднением по всей партии составили 83 696 рублей. Расчет был произведен для трех последовательно возрастающих разниц номинального значения и значения функциональной характеристики (табл. 4). Совокупные затраты участников поставки и заинтересованных сторон составят более половины стоимости партии продукта.

Таблица 4

Значения постоянной потерь и затрат для четырех показателей качества ССС и трех вариантов отклонений

Наименование показателей качества	Граница допуска		Номинальное значение	R	Затраты для разницы 1, руб.	Затраты для разницы 2, руб.	Затраты для разницы 3, руб.
	Ниж.	Верх.					
Средняя плотность, кг/м^3	500,0	1300,0	900,0	0,25	50625,0 при разнице 450	62500,0 при разнице 500	75625,0 при разнице 550
Подвижность растворной смеси, см	8,0	12,0	10,0	10000,0	62500,0 при разнице 2,5	90000,00 при разнице 3,0	122500,0 при разнице 3,5
Прочность при сжатии, МПа	2,50	5,0	3,75	25600,0	57600,0 при разнице 1,50	78400,0 при разнице 1,75	129600,0 при разнице 1,25
Водопоглощение при капиллярном подсосе	0	0,40	0,20	1000000,0	62500,0 при разнице 0,25	90000,0 при разнице 0,30	122500,0 при разнице 0,35

Приведенные результаты расчетов демонстрируют, что, регулируя дозирование компонентов ССС, можно повысить уровень эффективности управления исполнением контрактных обязательств сторонами-участниками поставки ССС.

Таким образом, в целях обеспечения эффективного управления поставками строительного предприятия требуется использовать подходы, нацеленные на выявление нарушений требований качества продукта до осуществления его поставки покупателю. Показатели рисков покупателя и поставщика являются величинами, объединяющими характеристики операционного контроля технологического процесса, что позволяет делать вывод относительно вероятности появления поставки, не удовлетворяющей требованиям до ее осуществления, и тем самым исключить возникновение затрат, обеспечив управление исполнением контрактных обязательств.

Список литературы

1. Carter, R. Practical Procurement / R. Carter. – Second edition. – UK: Liverpool Academic Press, 2014. – P. 57–61.

2. Lysons, K. Procurement and supply chain management / K. Lysons, B. Farrington. – 8th edition // Pearson Education. – 2012. – P. 124–131.

3. Kraljic, P. Purchasing Must Become Supply Management / P. Kraljic // Harvard Business Review. – 1983. – P. 4.

4. Зайцева, М.В. Оценка рисков потерь качества при управлении закупками / М.В. Зайцева // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2023. – Т. 3, № 10(139). – С. 73–79. – 10.36871/ ek.up.p.r.2023.10.03.010. – DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2023.10.03.010 .

5. Зайцева, М.В. Управление закупочной деятельностью строительного предприятия / М.В. Зайцева, Т.В. Учаева // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2023. – № 1(276). – С. 67–71.

6. Материалы всероссийского форума «Управление Промышленными Закупками – 2024. Дорожная Карта Развития». – URL: https://zdirector.ru/event/upravlenie-promyshlennymi-zakupkami-2024/ .

7. Материалы деловой конференции «Управление коммерческими закупками – поиск решений цифровизации в новых условиях» РЭУ им. Г.В. Плеханова. – URL: https://xn--p1ag3a.xn--p1ai/events/9979-delovaya-konferentsiya-upravlenie-kommercheskimi-zakupkami--poisk-resheniy-tsifrovizatsii-v-novyih-usloviyah .

8. Логанина, В.И. К вопросу о системе контроля качества на предприятиях стройиндустрии / В.И. Логанина, Т.В. Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 1. – С. 31–33.

9. Flanagan, R. Risk management and construction / R. Flanagan, G. Norman. – Blackwell. – Oxford, 1993. – P. 35–48.

10. Porter, M. Competitive advantage / M. Porter. – New York: Free Press, 1985. – 84 p.

11. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И. Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3–4 (603-604). – С. 42–45.

12. Логанина, В.И. Организация статистического приемочного контроля качества строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 98–99.

13. Taguchi, G. Introduction to Quality Engineering / G. Taguchi. – Asian Productivity Organisation, 1986. – P. 10.

References

1. Carter, R. Practical Procurement / R. Carter. – Second edition. – UK: Liverpool Academic Press, 2014. – P. 57–61.

2. Lysons, K. Procurement and supply chain management / K. Lysons, B. Farrington. – 8th edition // Pearson Education. – 2012. – P. 124–131.

3. Kraljic, Pr. Purchasing Must Become Supply Management / P. Kraljic // Harvard Business Review. – 1983. – P. 4.

4. Zaytseva, M.V. Assessing the risks of quality losses in procurement management / M.V. Zaitseva // Economics and management: problems, solutions. – 2023. – Vol. 3, No. 10(139). – P. 73–79. – 10.36871/ ek.up.p.r.2023.10.03.010. – DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2023.10.03.010 .

5. Zaytseva, M.V. Management of procurement activities of a construction enterprise / M.V. Zaitseva, T.V. Uchaeva // Construction materials, equipment, technologies of the XXI century. – 2023. – No. 1(276). – P. 67–71.

6. Materials of the All-Russian forum “Industrial Procurement Management – 2024. Road Map of Development”. – URL: https://zdirector.ru/event/upravlenie-promyshlennymi-zakupkami-2024/.

7. Materials of the business conference “Commercial procurement management – searching for digitalization solutions in new conditions” REU im. G.V. Plekhanov. – URL:

https://xn--p1ag3a.xn--p1ai/events/9979-delovaya-konferentsiya-upravlenie-kommercheskimi-zakupkami--poisk-resheniy-tsifrovizatsii-v-novyih-usloviyah.

8. Loganina, V.I. On the issue of quality control system at construction industry enterprises / V.I. Loganina, T.V. Uchaeva // Regional architecture and engineering. – 2010. – No. 1. – P. 31–33.

9. Flanagan, R. Risk management and construction / R. Flanagan, G. Norman. – Blackwell. – Oxford, 1993. – P. 35–48.

10. Porter, M. Competitive advantage / M. Porter. – New York: Free Press, 1985. – 84 p.

11. Loganina, V.I. On the issue of regulating technological processes in concrete production / V.I. Loganina // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – No. 3–4 (603–604). – P. 42–45.

12. Loganina, V.I. Organization of statistical acceptance control of the quality of building products and structures / V.I. Loganina ///Building materials. – 2008. – No. 8. – P. 98–99.

13. Taguchi, G. Introduction to Quality Engineering / G. Taguchi. – Asian Productivity Organisation, 1986. – P. 10.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624

DOI 10.54734/20722958_2024_3_48

Казанский государственный энергетический университет

Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д.51

Айзатуллин Марат Мансурович,
соискатель, почетный строитель России
E-mail: marat.ayzatullin@tatar.ru

Зарипов Марсель Мансурович,
соискатель, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники
E-mail: zaripovmm@list.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

Сабитов Линар Салихзанович,
доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и организация строительного производства», советник РААСН, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники
E-mail: l.sabitov@bk.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

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

Kazan State Energy University

Russia, Kazan, st. Krasnoselskaya, 51

Ayzatullin Marat Mansurovich,
Postgraduate, honorary builder of Russia
E-mail: marat.ayzatullin@tatar.ru

Zaripov Marsel Mansurovich,
Postgraduate, laureate of the Russian Government Prize in the field of science and technology
E-mail: zaripovmm@list.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering

Russia, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26

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

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОРТАЛЬНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ ОПОР

М.М. Айзатуллин, М.М. Зарипов, Л.С. Сабитов, И.А. Гарькина

Предлагаются новые технические решения трехгранных портальных решетчатых конструкций, используемых при строительстве и проектировании опор контактных сетей электрического и железнодорожного транспорта, опор линий электропередачи (ЛЭП), опор открытых распределительных устройств (ОРУ), опор дорожных знаков и

т.д. Рассматриваются конструктивно-технологические особенности их изготовления и дается сравнительный анализ с аналогичными четырехгранными портальными опорами. Практическая значимость технических решений подтверждена получением патента РФ на полезные модели портальных решетчатых конструкций.

Ключевые слова: портал, решетчатая трехгранная конструкция, опора контактной сети, опора линии электропередачи, технико-экономические показатели

STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF PORTAL LATTICE SUPPORTS CONSTRUCTION

M.M. Ayzatullin, M.M. Zaripov, L.S.Sabitov, I.A.Garkina

New technical solutions for triangular portal lattice structures used in the construction and design of supports for contact networks of electric and railway transport, supports for power transmission lines (PTL), supports for open switchgear (OSG), supports for road signs, etc. are proposed. Design and technological features of their manufacture are considered, and a comparative analysis with similar tetrahedral portal supports is given. Russian Federation patents for utility models of portal lattice structures have been obtained.

Keywords: portal, lattice triangular structure, contact network support, power line support, technical and economic indicators

В энергетическом, транспортном, промышленном строительстве широко применяются портальные конструкции различного назначения. Это и конструкции открытых и закрытых распределительных устройств (ОРУ и ЗРУ), башни линий электропередачи (ЛЭП), контактные сети электрического и железнодорожного транспорта, строительные конструкции эстакад и этажерок, опоры дорожных знаков, опоры сигнальных мостиков, рекламные сооружения и т.д. [1–3].

При строительстве металлических порталов применяются различные конструктивные решения (решетчатые, сплошно-стенчатые и комбинированные). Решетчатые представляют собой пространственные фермы, выполняемые обычно из уголков или швеллеров; к сплошно-стенчатым относят опоры, изготовленные из широкополочных двутавров или труб большого диаметра (20-30 см), из многогранных трубчатых стержней. Комбинированные представляют собой опоры из металлических или железобетонных центрифугированных стоек и балки из решетчатой балки или фермы (рис.1).

Основным преимуществом сплошно-стенчатых конструкций является их меньший вес, но они более трудоемкие при изготовлении и рассчитаны на небольшие высоты и пролеты. Опоры сплошно-стенчатой конструкции просты в изготовлении, но требуют большего (на 50-100 % по сравнению с решетчатыми) расхода металла, поэтому при строительстве опоры сплошно-стенчатых конструкций почти не применяют [4].

Здесь предлагаются четыре новых технических решения портальных опор различной конфигурации и назначения.

Первая портальная опора [5] включает две секционные стойки и горизонтальную траверсу, прикрепленную к верхним концам верхних секций стоек; отличается тем, что секционные стойки и горизонтальная траверса выполнены в виде трехгранных решетчатых конструкций, при этом горизонтальная траверса не выступает за наружные грани верхних секций стоек в вертикальной плоскости (рис. 2).

Портальная опора содержит две секционные стойки 1, горизонтальную траверсу 2, прикрепленную к верхним концам верхних секций стоек 1.

Применение трехгранных решетчатых конструкций секционных стоек 1 и горизонтальной траверсы 2 позволяет обеспечить пространственную жесткость без использования жестких внутренних перекрестных связей, сократить количество составных элементов, увеличить несущую способность и тем самым повысить прочность конструкции портальной опоры, снизить ее металлоемкость и трудоемкость изготовления.

Вторая портальная опора линии электропередачи [6] включает две секционные стойки и горизонтальную траверсу, прикрепленную к верхним концам верхних секций стоек; отличается тем, что секционные стойки и горизонтальная траверса выполнены в виде трехгранных решетчатых конструкций, при этом горизонтальная траверса выступает за наружные грани верхних секций стоек в вертикальной плоскости (рис. 3).

а) решетчатая опора ЛЭП

б) решетчатая опора ОРУ

в) сплошностенчатая опора ЛЭП

г) комбинированная опора контактной сети

Рис. 1. Портальные опоры различного назначения

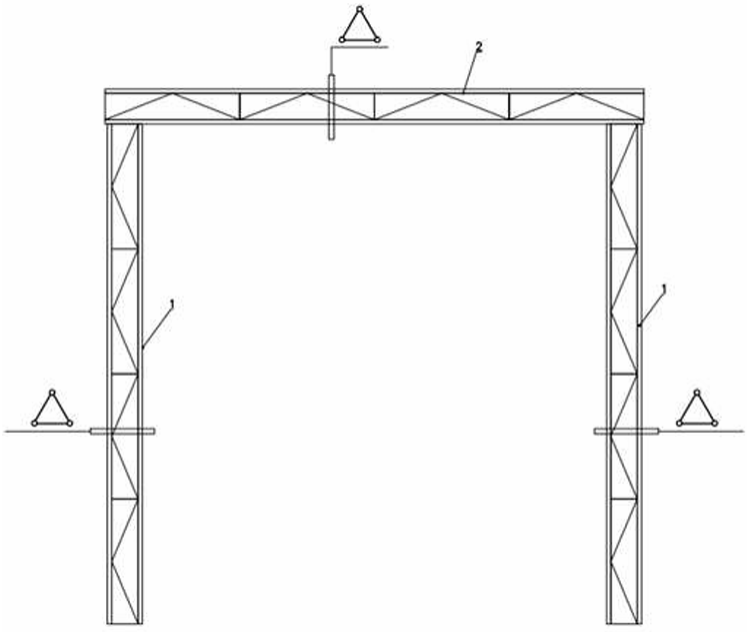


Рис. 2. Новая конструкция портальной опоры

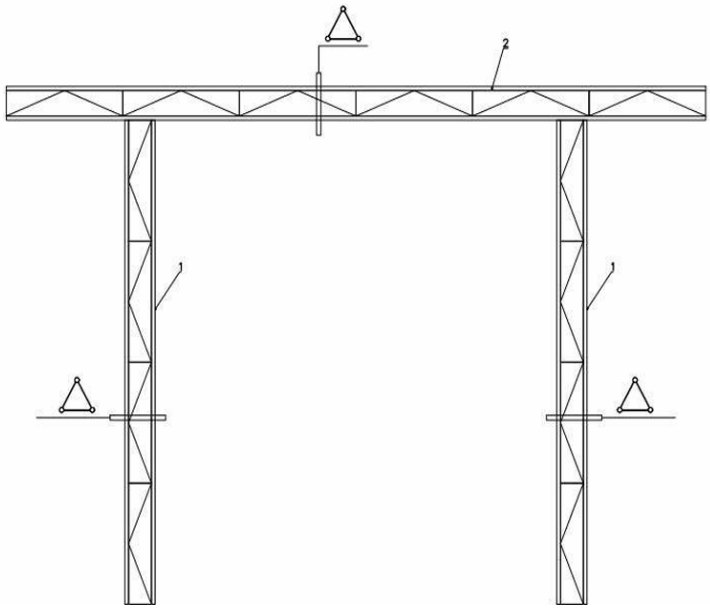


Рис. 3. Новая конструкция портальной опоры линии электропередачи

Портальная опора линии электропередачи содержит две секционные стойки 1, горизонтальную траверсу 2, прикрепленную к верхним концам верхних секций стоек 1.

Применение трехгранных решетчатых конструкций секционных стоек 1 и горизонтальной траверсы 2 позволяет обеспечить пространственную жесткость без использования жестких внутренних перекрестных связей, сократить количество составных элементов, увеличить несущую способность и тем самым повысить прочность конструкции портальной опоры линии электропередачи, снизить ее металлоемкость и трудоемкость изготовления.

Третья портальная опора переменного сечения [7] включает две секционные стойки и горизонтальную траверсу, прикрепленную к верхним концам верхних секций стоек; отличается тем, что секционные стойки и горизонтальная траверса выполнены в виде трехгранных решетчатых конструкций, при этом горизонтальная траверса не выступает за наружные грани верхних секций стоек в вертикальной плоскости, а нижние секции стоек выполнены в виде башни, ширина которой меняется по высоте (рис. 4).

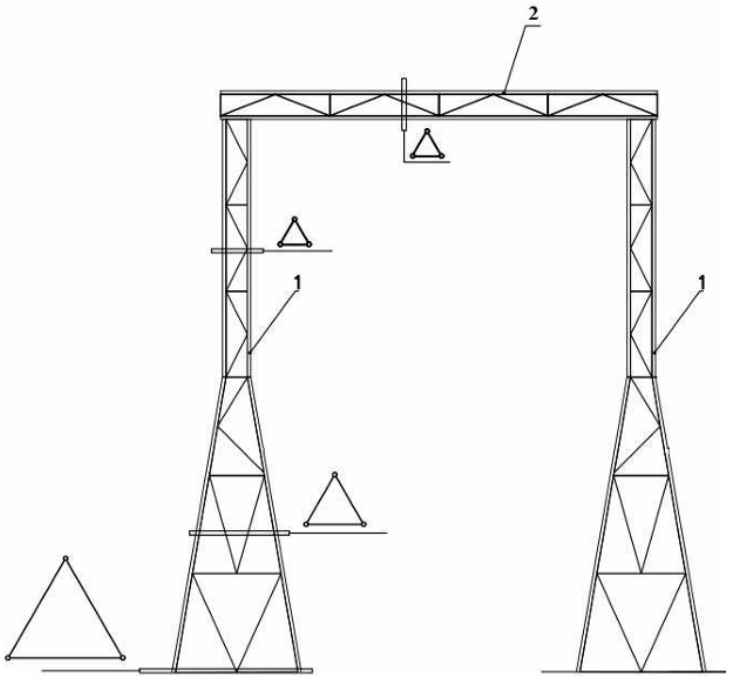


Рис. 4. Новая конструкция портальной опоры переменного сечения

Портальная опора переменного сечения содержит две секционные стойки 1, горизонтальную траверсу 2, прикрепленную к верхним концам верхних секций стоек 1. Применение трехгранных решетчатых конструкций секционных стоек 1 и горизонтальной траверсы 2 позволяет обеспечить пространственную жесткость без использования жестких внутренних перекрестных связей, сократить количество составных элементов, увеличить несущую способность, тем самым повысить прочность конструкции портальной опоры переменного сечения, снизить ее металлоемкость и трудоемкость изготовления.

Четвертая портальная опора переменного сечения линии электропередачи [8] включает две секционные стойки и горизонтальную траверсу, прикрепленную к верхним концам верхних секций стоек; отличается тем, что секционные стойки и горизонтальная траверса выполнены в виде трехгранных решетчатых конструкций, при этом горизонтальная траверса выступает за наружные грани верхних секций стоек в вертикальной плоскости, а нижние секции стоек выполнены в виде башни, ширина которой меняется по высоте (рис. 5–7).

Портальная опора переменного сечения линии электропередачи содержит две секционные стойки 1, горизонтальную траверсу 2, прикрепленную к верхним концам верхних секций стоек 1.

Применение трехгранных решетчатых конструкций секционных стоек 1 и горизонтальной траверсы 2 позволяет обеспечить пространственную жесткость без использования жестких внутренних перекрестных связей, сократить количество составных элементов, увеличить несущую способность, тем самым повысить прочность конструкции портальной опоры переменного сечения линии электропередачи, снизить ее металлоемкость и трудоемкость изготовления.

Сравнительные характеристики технико-экономических показателей четырехгранных и предлагаемых трехгранных портальных опор представлены в табл. 1–4.

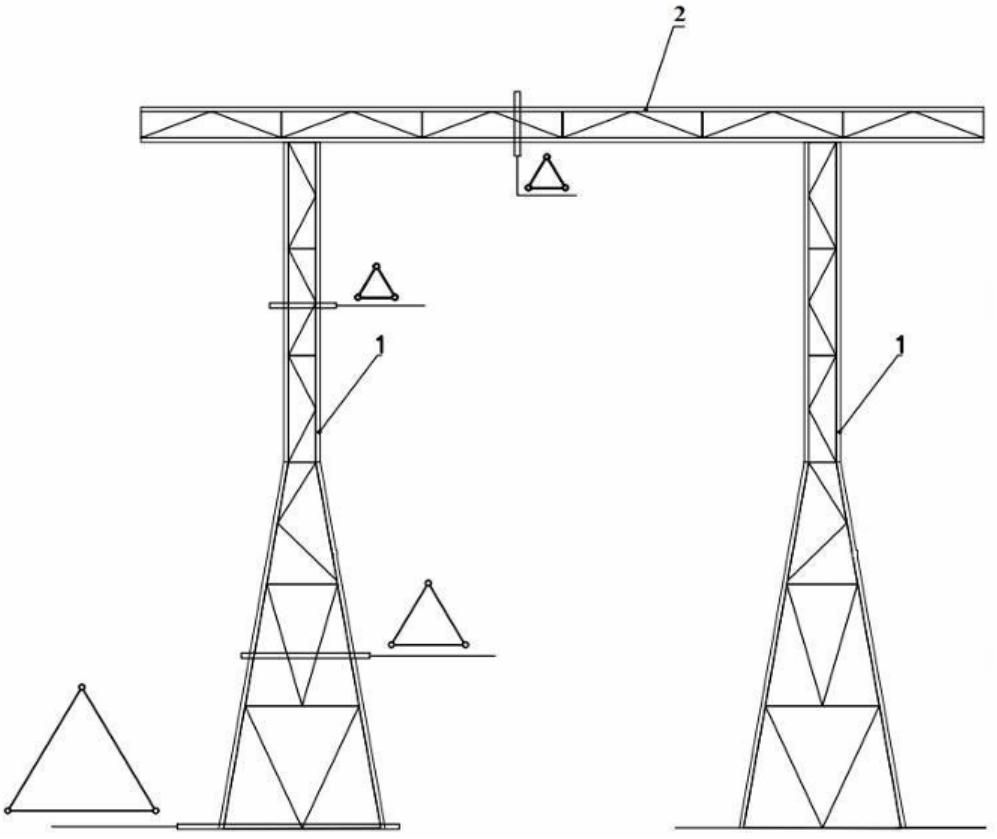


Рис. 5. Новая конструкция портальной опоры переменного сечения линии электропередачи

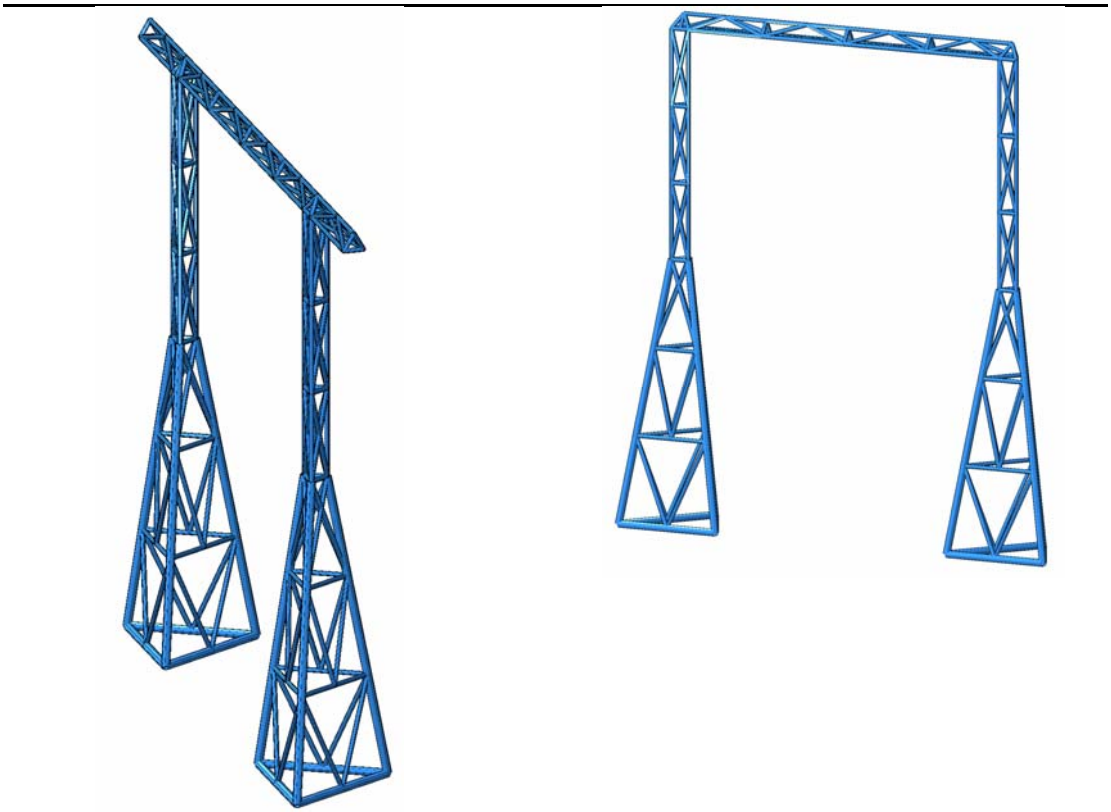


Рис. 6. Расчетная схема портальной опоры

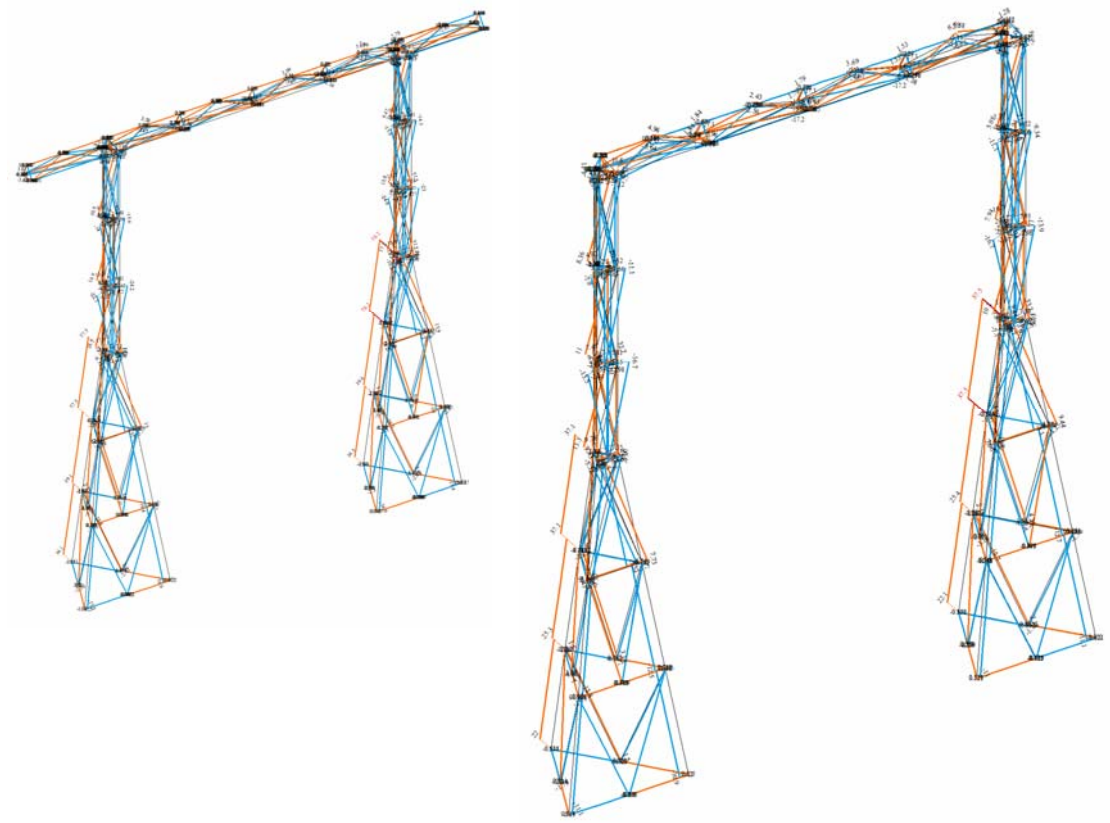


Рис. 7. Расчетная схема портальной опоры

Таблица 1

Сравнение технико-экономических показателей

	Четырехгранная портальная опора линии электропередачи высотой 16 м, шириной 24 м		Трехгранная портальная опора линии электропередачи высотой 16 м, шириной 24 м	
Металлоемкость конструкции портальной опоры линии электропередачи, кг	Стойка	672	Стойка	557,76
	Траверса	812	Траверса	673,96
Трудоемкость изготовления конструкции портальной опоры линии электропередачи, длина шва (м) / норма времени ($Н_{вр}$)	806/338,52		643,1/270,1	
Прочность конструкции портальной опоры линии электропередачи, усилие в абсолютных значениях (т)	пояс	98,37	пояс	78,25
	раскос	5,95	раскос	3,258
	распорка	2,97	распорка	1,43

Таблица 2

Сравнение технико-экономических показателей

	Четырехгранная портальная опора высотой 16 м, шириной 15,4 м		Трехгранная портальная опора высотой 16 м, шириной 15,4 м	
Металлоемкость конструкции портальной опоры линии электропередачи, кг	Стойка	672	Стойка	557,76
	Траверса	701	Траверса	581,83
Трудоемкость изготовления конструкции портальной опоры линии электропередачи, длина шва (м) / норма времени ($Н_{вр}$)	606/254,52		441,9/185,6	
Прочность конструкции портальной опоры линии электропередачи, усилие в абсолютных значениях (т)	пояс	93,3	пояс	62,043
	раскос	8,99	раскос	7,25
	распорка	1,789	распорка	1,56

Таблица 3

Сравнение технико-экономических показателей

	Четырехгранная портальная опора переменного сечения высотой 16 м, шириной 15,4 м		Трехгранная портальная опора Переменного сечения высотой 16 м, шириной 15,4 м	
Металлоемкость конструкции портальной опоры линии электропередачи, кг	Стойка	872	Стойка	723,76
	Траверса	999	Траверса	829,2
Трудоемкость изготовления конструкции портальной опоры линии электропередачи, длина шва (м) / Норма времени ($Н_{вр}$)	724/ 304,08		548,2 / 230,24	
Прочность конструкции портальной опоры линии электропередачи, усилие в абсолютных значениях (т)	пояс	85,12	пояс	72,05
	раскос	7,36	раскос	6,23
	распорка	1,56	распорка	1,32

Таблица 4

Сравнение технико-экономических показателей

	Четырехгранная портальная опора переменного сечения линии электропередачи высотой 16 м, шириной 24 м		Трехгранная портальная опора переменного сечения линии электропередачи высотой 16 м, шириной 24 м	
Металлоемкость конструкции портальной опоры линии электропередачи, кг	Стойка	872	Стойка	723,76
	Траверса	1230	Траверса	984,17
Трудоемкость изготовления конструкции портальной опоры линии электропередачи, длина шва (м) / Норма времени ($Н_{вр}$)	1120 / 470,4		960 /403,2	
Прочность конструкции портальной опоры линии электропередачи, усилие в абсолютных значениях (т)	пояс	103,8	пояс	88,2
	раскос	9,1	раскос	8,25
	распорка	2,85	распорка	2,4

Выводы

1. Проведен анализ существующих портальных конструкций контактных сетей электрического и железнодорожного транспорта, опор ЛЭП, ОРУ и предложены четыре новых технических решения.

2. Произведены технико-экономические сравнения четырехгранных и трехгранных портальных конструкций. Показано, что применение трехгранных решетчатых конструкций для секционных стоек и горизонтальной траверсы приводит к уменьшению количества элементов (пояс, раскосы, распорка) и их массы (до 18 %), исключает необходимость устройства дополнительных поперечных диафрагм, уменьшает количество соединений, сварных швов и их общую длину, соответственно, снижает трудоемкость изготовления и металлоемкость.

Список литературы

1. Стрелков, Ю.М. Конструктивно-технологические особенности строительства ветроэлектрических установок и воздушных линий с учетом новых технических решений / Ю.М. Стрелков, Л.С. Сабитов, Л.Р. Маилян, Л.Ш. Ахтямова, И.Н. Гарькин // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 4 (100). – С. 369–378.

2. Данилов, А.М. Спектральные методы при анализе динамических систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 3. – С. 109–113.

3. Бадертдинов, И.Р. Разработка методики расчета на устойчивость упруго опёртых тонкостенных стержней открытого сечения решетчатых конструкций башенных сооружений / И.Р. Бадертдинов, И.Л. Кузнецов, Л.С. Сабитов, Л.Ш. Ахтямова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 8. – С. 59–61.

4. Сабитов, Л.С. Оптимизация формы поперечного сечения поясов трехгранных решетчатых опор / Л.С. Сабитов, И.Р. Бадертдинов, А.С. Чепурненко // Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 7, № 4. – С. 5–8.

5. Патент, RU 227347, E04H 12/10. Портальная опора / Сабитов Л.С., Абдуллазянов Э.Ю., Айзатуллин М.М., Зарипов М.М., Мажиев А.Х., Гатиятов И.З., Стрелков В.Ю., Чанчина В.Е. патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», заяв. 02.02.2024, опубл. 17.07.2024, бюл. №20.

6. Патент, RU 227344, E04H 12/10. Портальная опора линии электропередачи / Сабитов Л.С., Абдуллазянов Э.Ю., Айзатуллин М.М., Зарипов М.М., Мажиев А.Х., Давлетьяров Р.М., Зиганшин А.Д, Чанчина В.Е.; патентообладатель ФГБОУ ВО

«Казанский государственный энергетический университет», заяв. 02.02.2024, опубл. 17.07.2024, бюл. №20.

7. Патент, RU 227322, E04H 12/10. Портальная опора переменного сечения / Сабитов Л.С., Абдуллазянов Э.Ю., Айзатуллин М.М., Зарипов М.М., Мажиев А.Х., Хайретдинов Р.Р., Радайкин О.В., Набиуллина М.Ф.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», заяв. 02.02.2024, опубл. 16.07.2024, бюл. №20.

8. Патент, RU 227349, E04H 12/10. Портальная опора переменного сечения линии электропередачи / Сабитов Л.С., Абдуллазянов Э.Ю., Айзатуллин М.М., Зарипов М.М., Мажиев А.Х., Бережной Д.В. Радайкин О.В., Набиуллина М.Ф.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», заяв. 02.02.2024, опубл. 16.07.2024, бюл. №20.

References

1. Strelkov, Yu.M. Structural and technological features of the construction of wind power plants and overhead lines taking into account new technical solutions / Yu.M. Strelkov, L.S. Sabitov, L.R. Mailyan, L.Sh. Akhtyamova, I.N. Garkin // Engineering Bulletin of the Don. – 2023. – No. 4 (100). – P. 369–378.

2. Danilov, A.M. Spectral methods in the analysis of dynamic systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina, I.N. Garkin // Regional architecture and emgineering. – 2014. – №3. – P. 109–113.

3. Badertdinov, I.R. Development of a methodology for calculating the stability of elastically supported thin-walled rods of open cross-section of lattice structures of tower buildings / I.R. Badertdinov, I.L. Kuznetsov, L.S. Sabitov, L.Sh. Akhtyamova // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. – 2019. – №. 8. – P. 59–61.

4. Sabitov, L.S. Optimization of the cross-sectional shape of belts of triangular lattice supports / L.S. Sabitov, I.R. Badertdinov, A.S. Chepurnenko // Construction and Architecture. – 2019. – Vol. 7, №. 4. – P. 5–8.

5. Patent, RU 227347, E04N 12/10. Portal support / Sabitov L.S., Abdullazyanov E.Yu., Aizatullin M.M., Zaripov M.M., Mazhiev A.Kh., Gatiyatov I.Z. , Strelkov V.Yu., Chanchina V.E. patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Energy University», appl. 02.02.2024, publ. 07.17.2024, bulletin. № 20.

6. Patent, RU 227344, E04N 12/10. Portal transmission line support / L.S. Sabitov, E.Yu. Abdullazyanov, M.M. Aizatullin, M.M. Zaripov, A.Kh. Mazhiev, R. Davletyarov. M., Ziganshin A.D., Chanchina V.E. patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Energy University», appl. 02.02.2024, publ. 07/17/2024, bulletin. № 20.

7. Patent, RU 227322, E04N 12/10. Portal support of variable cross-section / Sabitov L.S., Abdullazyanov E.Yu., Aizatullin M.M., Zaripov M.M., Mazhiev A.Kh., Khairetdinov R.R., Radaikin O.V., Nabiullina M.F. patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Energy University», appl. 02.02.2024, publ. 07/16/2024, bulletin. № 20.

8. Patent, RU 227349, E04N 12/10. Portal support of variable cross-section of a power transmission line / Sabitov L.S., Abdullazyanov E.Yu., Aizatullin M.M., Zaripov M.M., Mazhiev A.Kh., Berezhnoy D.V. Radaykin, O.V., Nabiullina M.F. Patent holder: Kazan State Power Engineering University, declared 02.02.2024, published 16.07.2024, bulletin №20.

УДК 691.327:539.4 DOI 10.54734/20722958_2024_3_57

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
и технология строительного производства»
E-mail: maksimovain@mail.ru

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

Makridin Nikolai Ivanovich,
Doctor of Sciences, Chief Researcher
of the research sector

Maksimova Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Quality Management
and Construction Production Technology»
E-mail: maksimovain@mail.ru

ПАРАМЕТРЫ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

Проведена сравнительная вариационно-статистическая оценка параметров качества: критического коэффициента интенсивности напряжений K_c^* цементных композитов на двух видах портландцемента, один из которых бездобавочный марки М500-Д0, а другой – М500-Д20. Сравнительные серии опытных образцов изготавливали при трех расходах цемента: 481; 289 и 385 кг/м^3 бетона. Качество параметров трещиностойкости оценивали как на ранней, так и на поздней стадии структурообразования и твердения цементных систем в диапазоне времени 18 лет на статистической совокупности однородных опытных данных из семи и восьми образцов.

Ключевые слова: неравновесные испытания; характеристики трещиностойкости; вариационно-статистическая оценка; параметры качества; структурообразование; цементный композит, статистическая совокупность

PARAMETERS OF CRACK RESISTANCE OF CEMENT COMPOSITES

N.I. Makridin, I.N. Maksimova

A comparative variational and statistical assessment of quality parameters has been carried out: the critical stress intensity coefficient K_c^* of cement composites on two types of Portland cement, one of which is additive-free grade M500-D0, and the other is M500-D20. Comparative series of prototypes have been produced at three cement costs: 481; 289 and 385 kg/m^3 of concrete. The quality of crack resistance parameters has been evaluated both at the early and late stages of structure formation and hardening of cement systems in the time range of 18 years on a statistical set of homogeneous experimental data from seven and eight samples.

Keywords: non-equilibrium tests; crack resistance characteristics; variational and statistical assessment; quality parameters; structure formation; cement composite; statistical set

Как известно, важнейшей механической характеристикой цементных дисперсных систем, предопределяющей их механическое поведение во времени, является конструкционная прочность как комплексная механическая характеристика, включающая сочетание критериев прочности, надежности и долговечности.

В свою очередь, важнейшим параметром конструкционной прочности материала является его трещиностойкость (вязкость разрушения). Трещиностойкость представляет собой инженерный термин, который ГОСТ 29167-2021 [1] определяет как способность бетона сопротивляться началу движения и развитию трещин при механических и других воздействиях.

В современных условиях в основу разработки бетонов нового поколения (БНП) положена новая концепция бетоноведения – получение высокоподвижной матричной фазы бетонной смеси; проблема длительной конструкционной прочности БНП приобретает особый научный и практический интерес с позиций как выбора технологической и физико-химической оптимизации структуры, так и прогнозирования механических свойств цементных композитов.

Расширение областей применения цементных композитов и повышение требований к их конструкционным свойствам требуют более глубокого понимания материаловедческих функций зависимости критериев прочности, надежности и долговечности от механики и технологии, состава и структуры конструкционных композитов, достигаемого путем комплексной оценки результатов сравнительных испытаний механического поведения под нагрузкой опытных образцов разного состава и структуры как с позиций механики деформируемого твердого тела (МДТТ), так и структурной механики разрушения материалов (СМРМ).

Изучение природы механических свойств БНП с позиций МДТТ и СМРМ [2–9], а также вариационно-статистическая оценка качества параметров прочности и трещиностойкости цементных композитов на ранней и поздней стадиях их структурообразования и твердения доказывают необходимость широкого внедрения в исследовательскую практику при разработке и создании материалов новых научных принципов комплексной оценки силовых, деформационных и энергетических критериев конструкционной прочности с получением феноменологических математических моделей этих свойств. Это и являлось целью и задачей нашего исследования по изучению характера изменения длительной конструкционной прочности и трещиностойкости структур цементных композитов, полученных при неравновесных механических испытаниях опытных образцов сравниваемых серий и испытанных по методике ГОСТ 29167-2021 на образцах типа I в разные сроки во временном диапазоне 6570 суток (18 лет).

Как известно, СМРМ в качестве меры свойства трещиностойкости предлагает две нормативные величины [1]: силовую – в терминах коэффициентов интенсивности напряжений K, МПа·м^{0,5}, и энергетическую – в терминах удельных энергозатрат G, МДж/м^2. Согласно ГОСТ 29167-2021, характеристику трещиностойкости K_c^*, МПа·м^{0,5}, – условного критического коэффициента интенсивности напряжений – по результатам неравновесных испытаний опытных образцов типа I определяли по [1, зависимость (9)].

Для изготовления сравниваемых опытных образцов использовали два вида портландцемента (ПЦ): Старооскольский ПЦ М500-Д0 с нормальной густотой 0,257 и Вольский ПЦ М500-Д20 с минеральной пуццолановой добавкой на основе опоки и с нормальной густотой 0,285. Для изготовления опытных образцов-призм типа I по ГОСТ 29167-2021 размером 40×40×160 мм использовали также Сурский речной песок, $М_{кр}$=1,63, высокопрочный гранитный щебень фракции 5–10 мм. На каждом виде ПЦ изготавливали на каждый принятый срок испытания опытных образцов (в возрасте бетона одни сутки после ТВО; в возрасте 28 и 90 суток после ТВО, на поздней стадии структурообразования и твердения – 18 лет) по 23 серии сравниваемых образцов одинакового состава с одинаковой удобоукладываемостью (2–4 см осадки конуса), твердевших в одинаковых условиях.

При этом, как следует из данных, приведенных в табл. 1 и 2, для изготовления опытных образцов было принято три расхода цемента: 481; 289 и 385 кг/м^3 бетона. В табл. 1 и 2 указаны также технологические и физико-химические факторы влияния на формирование структуры и параметров качества конструкционной прочности цементных композитов на сравниваемых ПЦ по времени.

В работе [10] отмечается, что фактор времени вызывает в бетоне проявление двух характерных разнонаправленных процессов: процесса нарастания прочности во времени (процесс старения бетона), определяемого физико-химическими изменениями его структуры, и процесса снижения прочности находящегося в напряженном состоянии бетона, связанного с проявлением его реологических свойств – ростом деформаций во времени, приводящим к определенным нарушениям внутренних связей в материале на микро- и макроуровнях.

Таблица 1

Технологические и физико-химические факторы влияния на формирование структуры и параметров конструкционной прочности цементных композитов на портландцементе марки М500-Д20 (ПО «Вольскцемент»)

Образец серии	Расход материалов на 1 м^3, кг					В/Ц	Режим ТВО, ч	Температура изотермии, °С	ТВО, °С·ч
	Ц	П	Щ	В	ПДО-М, % от массы Ц				
	Расход портландцемента 481 кг/м^3 бетона								
1в	481	615	1100	211	1,7	0,438	12+2+7,4+3	77	570
3в	481	615	1100	216	0,3	0,450	12+2+7,4+3	77	570
5в	481	615	1100	211	1,7	0,438	12+2+4,6+3	77	354
7в	481	615	1100	216	0,3	0,450	12+2+4,6+3	77	354
9в	481	615	1100	216	1,7	0,450	12+2+7,4+3	63	466
11в	481	615	1100	207	0,3	0,430	12+2+7,4+3	63	466
13в	481	615	1100	216	0,7	0,450	12+2+4,6+3	63	290
15в	481	615	1100	207	0,3	0,431	12+2+4,6+3	63	290
	Расход портландцемента 289 кг/м^3 бетона								
2в	289	932	1100	214	1,7	0,740	12+2+7,4+3	77	570
4в	289	932	1100	218	0,3	0,754	12+2+7,4+3	77	570
6в	289	932	1100	214	1,7	0,740	12+2+4,6+3	77	354
8в	289	932	1100	218	0,3	0,754	12+2+4,6+3	77	354
10в	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+7,4+3	63	466
12в	289	932	1100	214	0,3	0,741	12+2+7,4+3	63	466
14в	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+4,6+3	63	290
16в	289	932	1100	214	0,3	0,740	12+2+4,6+3	63	290
	Расход портландцемента 385 кг/м^3 бетона								
19в	385	774	1100	171	2,0	0,445	12+2+6+3	70	420
20в	385	774	1100	229	0,0	0,595	12+2+6+3	70	420
21в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+8+3	70	560
22в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+4+3	70	280
23в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	80	480
24в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	60	360
25в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	70	420

Таблица 2

Технологические и физико-химические факторы влияния на формирование структуры и параметров конструкционной прочности цементных композитов на портландцементе марки М500-Д0 (ПО «Осколцемент»)

Образец серии	Расход материалов на 1 м^3, кг					В/Ц	Режим ТВО, ч	Температура изотермии, °С	ТВО, °С·ч
	Ц	П	Щ	В	ПДО-М, % от массы Ц				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Расход портландцемента 481 кг/м^3 бетона								
1с	481	615	1100	196	1,7	0,407	12+2+7,4+3	77	570
3с	481	615	1100	201	0,3	0,418	12+2+7,4+3	77	570
5с	481	615	1100	196	1,7	0,407	12+2+4,6+3	77	354
7с	481	615	1100	201	0,3	0,418	12+2+4,6+3	77	354

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9с	481	615	1100	216	1,7	0,450	12+2+7,4+3	63	466
11с	481	615	1100	207	0,3	0,430	12+2+7,4+3	63	466
13с	481	615	1100	216	0,7	0,450	12+2+4,6+3	63	290
15с	481	615	1100	207	0,3	0,431	12+2+4,6+3	63	290
	Расход портландцемента 289 кг/м^3 бетона								
2с	289	932	1100	229	1,7	0,792	12+2+7,4+3	77	570
4с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+7,4+3	77	570
6с	289	932	1100	229	1,7	0,792	12+2+4,6+3	77	354
8с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+4,6+3	77	354
10с	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+7,4+3	63	466
12с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+7,4+3	63	466
14с	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+4,6+3	63	290
16с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+4,6+3	63	290
	Расход портландцемента 385 кг/м^3 бетона								
19с	385	774	1100	171	2,0	0,444	12+2+6+3	70	420
20с	385	774	1100	207	0,0	0,538	12+2+6+3	70	420
21с	385	774	1100	185	1,0	0,480	12+2+8+3	70	560
22с	385	774	1100	185	1,0	0,480	12+2+4+3	70	280
23с	385	774	1100	185	1,0	0,480	12+2+6+3	80	480
24с	385	774	1100	185	1,0	0,480	12+2+6+3	60	360
25с	385	774	1100	185	1,0	0,480	12+2+6+3	70	420

Вариационно-статистическую сравнительную оценку качества параметров критического коэффициента интенсивности напряжений K_c^* цементных композитов на двух видах портландцемента (и при трех его расходах на каждом виде ПЦ), как указано в табл. 3 и 4, проводили на статистической совокупности опытных образцов сравниваемых серий, состоящей из семи и восьми опытных составов, что позволило получить обширный экспериментальный материал для сравнительного анализа и получения кинетических зависимостей процессов структурообразования и твердения в рассматриваемом диапазоне времени 18 лет.

Результаты вариационно-статистической оценки качества параметров трещиностойкости K_c^* цементных композитов во времени приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Характер изменения качества параметров трещиностойкости цементных композитов во времени на портландцементе марки М500-Д20 (ПО «Вольскцемент»)

Серия образцов	Коэффициент интенсивности напряжения K_c^*, МПа·м^{0,5}			
	Возраст бетона, t, сут			
	1	28	90	6570
1	2	3	4	5
	Расход портландцемента 481 кг/м^3 бетона			
1в	0,628	0,703/1,12	0,705/1,03	1,15/1,63
3в	0,606	0,687/1,13	0,656/0,95	1,41/1,69
5в	0,656	0,760/1,16	0,808/1,06	1,111/1,38
7в	0,589	0,760/1,29	0,769/1,01	1,111/1,44
9в	0,579	0,864/1,49	0,760/0,88	1,06/1,39
11в	0,583	0,849/1,45	0,707/0,83	1,217/1,72
13в	0,583	0,804/1,38	0,683/0,85	1,01/1,48
15в	0,556	0,807/1,45	0,758/0,94	1,07/1,41

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5
	Для K_c^*: среднее арифметическое (M), среднее квадратическое отклонение (σ), вариационный коэффициент (υ)			
	M =0,598 МПа·м^{0,5}	M =0,779 МПа·м^{0,5}	M =0,731 МПа·м^{0,5}	M =1,105 МПа·м^{0,5}
	σ = ±0,0316 МПа·м^{0,5}	σ = ±0,0637 МПа·м^{0,5}	σ = ±0,0509 МПа·м^{0,5}	σ = ±0,057 МПа·м^{0,5}
	υ = ±5,28 %	υ = ±8,19 %	υ = ±7,0 %	υ = ±5,16 %
	Расход портландцемента 289 кг/м^3 бетона			
2в	0,422	0,417/0,99	0,454/1,09	0,631/1,39
4в	0,331	0,367/1,11	0,404/1,1	0,495/1,22
6в	0,355	0,453/1,27	0,477/1,05	0,681/1,43
8в	0,276	0,351/1,27	0,404/1,15	0,454/1,12
10в	0,299	0,496/1,66	0,504/1,02	0,581/1,15
12в	0,254	0,433/1,7	0,353/0,82	1,0/2,83
14в	0,249	0,470/1,9	0,581/1,24	0,758/1,3
16в	0,204	0,388/1,4	0,379/0,98	0,666/1,75
	Для K_c^*: среднее арифметическое (M), среднее квадратическое отклонение (σ), вариационный коэффициент (υ)			
	M =0,299 МПа·м^{0,5}	M =0,422 МПа·м^{0,5}	M =0,444 МПа·м^{0,5}	M =0,658 МПа·м^{0,5}
	σ = ±0,0689 МПа·м^{0,5}	σ = ±0,0508 МПа·м^{0,5}	σ = ±0,0748 МПа·м^{0,5}	σ = ±0,172 МПа·м^{0,5}
	υ = ±23,0 %	υ = ±12,05 %	υ = ±16,87 %	υ = ±26,1 %
	Расход портландцемента 385 кг/м^3 бетона			
19в	0,444	0,680/1,53	0,546/0,80	1,161/2,12
20в	0,403	0,546/1,35	0,605/1,108	0,914/1,51
21в	0,385	0,650/1,69	0,707/1,09	1,06/1,5
22в	0,395	0,679/1,72	0,681/1,003	0,970/1,42
23в	0,373	0,507/1,36	0,591/1,16	0,909/1,54
24в	0,434	0,725/1,67	0,707/0,98	1,011/1,43
25в	0,385	0,679/1,76	0,707/1,04	1,021/1,44
	Для K_c^*: среднее арифметическое (M), среднее квадратическое отклонение (σ), вариационный коэффициент (υ)			
	M =0,403 МПа·м^{0,5}	M =0,638 МПа·м^{0,5}	M =0,649 МПа·м^{0,5}	M =1,007 МПа·м^{0,5}
	σ=±0,02663 МПа·м^{0,5}	σ = ±0,08 МПа·м^{0,5}	σ = ±0,0671 МПа·м^{0,5}	σ = ±0,0879 МПа·м^{0,5}
	υ = ±6,6 %	υ = ±12,5 %	υ = ±10,3 %	υ = ±8,73 %

Примечание. В возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно 90-суточного возраста.

Таблица 4

Характер изменения качества параметров трещиностойкости цементных композитов во времени на портландцементе марки М500-Д0 (ПО «Осколцемент»)

Серия образцов	Коэффициент интенсивности напряжения K_c^*, МПа·м^{0,5}			
	Возраст бетона, t, сут			
	1	28	90	6570
1	2	3	4	5
	Расход портландцемента 481 кг/м^3 бетона			
1с	0,661	0,799/1,21	0,749/0,937	1,065/1,42
3с	0,550	0,673/1,22	0,718/1,07	0,964/1,34
5с	0,610	0,829/1,36	0,820/0,99	1,161/1,42
7с	0,491	0,671/1,37	0,661/0,98	1,034/1,56
9с	0,526	0,760/1,44	0,860/1,13	0,994/1,16

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5
11с	0,479	0,773/1,53	0,733/0,95	1,01/1,38
13с	0,483	0,736/1,52	0,703/0,95	1,01/1,44
15с	0,396	0,622/1,57	0,779/1,25	1,06/1,36
	Для K_c^*: среднее арифметическое (M), среднее квадратическое отклонение (σ), вариационный коэффициент (υ)			
	M =0,525 МПа·м^{0,5}	M =0,733 МПа·м^{0,5}	M =0,753 МПа·м^{0,5}	M =1,037 МПа·м^{0,5}
	σ= ±0,0828 МПа·м^{0,5}	σ= ±0,06977 МПа·м^{0,5}	σ= ±0,06483 МПа·м^{0,5}	σ= ±0,06015 МПа·м^{0,5}
	υ = ±15,8 %	υ = ±9,52 %	υ = ±8,61 %	υ = ±5,8 %
	Расход портландцемента 289 кг/м^3 бетона			
2с	0,411	0,507/1,23	0,564/1,11	0,504/0,89
4с	0,283	0,307/1,08	0,410/1,34	0,502/1,22
6с	0,318	0,498/1,56	0,461/0,93	0,591/1,28
8с	0,155	0,306/1,97	0,410/1,34	0,530/1,29
10с	0,229	0,363/1,58	0,410/1,13	0,557/1,36
12с	0,129	0,369/2,86	0,334/0,90	0,404/1,21
14с	0,223	0,392/1,76	0,525/1,34	0,605/1,15
16с	0,157	0,334/2,12	0,308/0,92	0,353/1,15
	Для K_c^*: среднее арифметическое (M), среднее квадратическое отклонение (σ), вариационный коэффициент (υ)			
	M =0,238 МПа·м^{0,5}	M =0,385 МПа·м^{0,5}	M =0,428 МПа·м^{0,5}	M =0,506 МПа·м^{0,5}
	σ= ±0,0956 МПа·м^{0,5}	σ= ±0,0787 МПа·м^{0,5}	σ= ±0,0872 МПа·м^{0,5}	σ= ±0,08786 МПа·м^{0,5}
	υ = ±40,2 %	υ = ±20,4 %	υ = ±20,4 %	υ = ±17,4 %
	Расход портландцемента 385 кг/м^3 бетона			
19с	0,385	0,599/1,55	0,385/0,64	1,01/2,62
20с	0,288	0,518/1,8	0,636/1,23	0,984/1,55
21с	0,323	0,498/1,54	0,490/0,98	0,793/1,62
22с	0,308	0,582/1,89	0,649/1,11	1,06/1,63
23с	0,385	0,548/1,42	0,553/1,009	0,909/1,64
24с	0,423	0,710/1,67	0,612/0,86	1,01/1,65
25с	0,338	0,575/1,7	0,487/0,85	1,01/2,07
	Для K_c^*: среднее арифметическое (M), среднее квадратическое отклонение (σ), вариационный коэффициент (υ)			
	M =0,35 МПа·м^{0,5}	M =0,576 МПа·м^{0,5}	M =0,545 МПа·м^{0,5}	M =0,968 МПа·м^{0,5}
	σ= ±0,04875 МПа·м^{0,5}	σ= ±0,0692 МПа·м^{0,5}	σ= ±0,0963 МПа·м^{0,5}	σ= ±0,0892 МПа·м^{0,5}
	υ = ±13,93 %	υ = ±12,0 %	υ = ±17,7 %	υ = ±9,2 %

Примечание. В возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно 90-суточного возраста.

Приведенные в табл. 3 и 4 экспериментально найденные значения оценки качества параметров – среднего арифметического (M), среднего квадратического отклонения (σ), вариационного коэффициента (υ) – для опытных данных определяли по формулам: $M = \frac{\sum V}{n}$, где $\sum V$ – сумма всех вариант; n – число наблюдений (вариант); $\sigma = \pm\sqrt{\frac{\sum (V_i - M)^2}{n-1}}$, где $\sum (V_i - M)^2$ – сумма квадратов отклонений всех

вариант от среднего арифметического; n – число наблюдений (вариант); $\upsilon = \pm\frac{\sigma}{M}\cdot 100$, %.

В табл. 5 представлен анализ результатов вариационно-статистической оценки качества параметров M, σ и υ для критериев трещиностойкости в контрольные сроки ранней и поздней стадии структурообразования и твердения сравниваемых серий образцов, который дает дополнительную информацию для сравнения и оценки влияния минеральной добавки на основе опоки в Вольском ПЦ на формирование механических свойств цементных композитов в рассматриваемом диапазоне времени до 18 лет.

Таблица 5

Вариационно-статистическая оценка качества параметров трещиностойкости сравниваемых цементных композитов в контрольные сроки механических испытаний опытных образцов

Показатели M; σ; υ	Два вида портландцемента			
	М500-Д20		М500-Д0	
	Возраст образцов бетона			
	28 сут	6570 сут	28 сут	6570 сут
	Расход портландцемента 481 кг/м^3 бетона			
M, МПа·м^{0,5}	0,779	1,105	0,733	1,037
σ, МПа·м^{0,5}	0,0637	0,057	0,0698	0,06015
υ, %	8,19	5,16	9,52	5,8
	Расход портландцемента 289 кг/м^3 бетона			
M, МПа·м^{0,5}	0,422	0,658	0,385	0,506
σ, МПа·м^{0,5}	0,0508	0,172	0,0787	0,0879
υ, %	12,05	26,1	20,4	17,4
	Расход портландцемента 385 кг/м^3 бетона			
M, МПа·м^{0,5}	0,638	1,007	0,576	0,968
σ, МПа·м^{0,5}	0,08	0,0879	0,0692	0,0892
υ, %	12,5	8,73	12,0	9,2

В заключение проведенного в диапазоне времени от 1 суток после ТВО до 6570 суток долговременного и многодельного исследования по изучению влияния вида и расхода портландцемента марки 500-Д20 и марки 500-Д0 при изготовлении опытных образцов сравниваемых серий на качество параметров критического коэффициента интенсивности напряжений K_c^* цементных композитов как на ранней, так и на поздней стадии структурообразования и твердения цементных систем следует отметить, что на средние численные показатели качества M, σ и υ оказывают заметное влияние как вид, так и расход портландцемента. При этом вариационно-статистическая оценка качества параметров, приведенная в табл. 3, 4 и 5, четко отражает улучшение параметров качества с увеличением расхода портландцемента до 481 кг/м^3 бетона. Для примера в табл. 5 представлена кинетика изменения параметров качества M, σ и υ в контрольные сроки структурообразования и твердения цементных композитов в 28 и 6570 суток на сравниваемых портландцементах марки 500-Д20 и марки 500-Д0 при принятых в исследовании расходах цемента на 1 м^3 бетона в 481, 289 и 385 кг.

Оценивая результативность проделанной работы в целом, следует подчеркнуть, что основные минералы сравниваемых портландцементных клинкеров – C_3S и C_2S – соединения неустойчивые, образованные слабой поликремниевой кислотой и не очень сильным основанием $Ca(OH)_2$. Поэтому они при взаимодействии с водой подвергаются полному гидролизу. Образующаяся при этом химически очень активная поликремниевая кислота взаимодействует с водой и $Ca(OH)_2$. Структура поликремниевой

кислоты – пространственная сетка, структурной единицей которой является тетраэдр SiO_4^{4-}. Силикаты кальция – это силикаты с крупными катионами, структурной единицей в них является диортогруппа $[Si_2O_7]^{6-}$, инкремент волластонитовой цепочки $[Si_3O_9]^{6-}$, инкремент ксонотлитовой ленты $[Si_6O_{17}]^{10-}$ и инкремент тоберморитовой сетки $[Si_{12}O_{31}]^{14-}$.

По мере увеличения степени конденсации отношение O:Si изменяется от четырех у $[SiO_4]^{4-}$ до 2,4 у тоберморита, что приводит к понижению основности структуры, так как из структуры удаляются носители крайних основных свойств – ионы кислорода. Эффективный заряд на атомах кремния повышается, сила кислотных центров на атомах кремния у ГСК больше, чем у поликремниевой кислоты.

По результатам вариационно-статистической оценки качества параметров трещиностойкости сравниваемых цементных композитов в контрольные сроки с учетом физико-химического воззрения на процессы структурообразования и твердения, предложенного нами в [9], следует отдать предпочтение образцам бетона на основе Вольского портландцемента М500-Д20.

Список литературы

1. ГОСТ 29167-2021. Бетоны. Методы определения трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М., 2021.

2. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.

3. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.

4. Макридин, Н.И. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова. – М.: МГСУ, 2013. – 152 с.

5. Макридин, Н.И. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Ю.В. Полубарова // Известия вузов. Строительство. – 2015. – № 3. – С. 14–22.

6. Максимова, И.Н. О кинетических зависимостях процессов структурообразования и твердения цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 29–35.

7. Макридин, Н.И. Оптимизация структуры и прогнозирование конструкционной прочности бетонов нового поколения / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 4 (49). – С. 14-23.

8. Макридин, Н.И. Прогнозирование и оптимизация трещиностойкости модифицированных бетонов во времени / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 17–23.

9. Макридин, Н.И. Комплексная оценка критериев длительной прочности цементных композитов / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 3 (56). – С. 49–60.

10. Гениев, Г.А. Практический метод расчета длительной прочности бетона / Г.А. Гениев // Бетон и железобетон. – 1995. – № 4. – С. 25–27.

References

1. GOST 29167-2021. Concrete. Methods for determining crack resistance (fracture toughness) under static loading. – M., 2021.

2. Akhverdov, I.N. Fundamentals of concrete physics / I.N. Akhverdov. – M.: Stroyizdat, 1981. – 464 p.

3. Batrakov, V.G. Modified concretes. Theory and practice / V.G. Batrakov. – 2nd ed. – M.: Stroyizdat, 1998. – 768 p.

4. Makridin, N.I. Structure formation and structural strength of cement composites / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova. – M.: MGSU, 2013. – 152 p.

5. Makridin, N.I. Complex assessment of the quality parameters of the structure and mechanics of destruction of cement stone / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, Yu.V.Polubarova // Izvestiya of high schools. Building. – 2015. – No. 3. – P. 14–22.

6. Maksimova, I.N. On kinetic dependences of the processes of structure formation and hardening of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 4 (33). – P. 29–35.

7. Makridin, N.I. Optimization of structure and prediction of structural strength of new generation concretes / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 4 (49). – P. 14–23.

8. Makridin, N.I. Forecasting and optimization of crack resistance of modified concretes in time / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P. 17–23.

9. Makridin, N.I. Comprehensive assessment of criteria for long-term strength of cement composites / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 3 (56). – P. 49–60.

10. Geniev, G.A. Practical method for calculating the long-term strength of concrete / G.A. Geoniev // Concrete and Reinforced Concrete. – 1995. – No. 4. – P. 25–27.

УДК 624.154.1 DOI 10.54734/20722958_2024_3_66

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

Глухов Вячеслав Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Геотехника и дорожное строительство»
E-mail: gds@pguas.ru

Хрянина Ольга Викторовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Геотехника и дорожное строительство»
E-mail: olgahryanina@mail.ru

Янгуразов Юсеф Равилевич,
аспирант кафедры «Геотехника и дорожное строительство»
E-mail: yusef.yangurazov@inbox.ru

Волков Кирилл Олегович,
студент
E-mail: kirill.volkov130062002@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

Glukhov Viacheslav Sergeevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Geotechnics and Road Construction»
E-mail: gds@pguas.ru

Hryanina Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Geotechnics and Road Construction»
E-mail: olgahryanina@mail.ru;

Yangurazov Yusef Ravilevich,
Postgraduate student of the Department «Geotechnics and Road Construction»
E-mail: yusef.yangurazov@inbox.ru

Volkov Kirill Olegovich,
Student
E-mail: kirill.volkov130062002@yandex.ru

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СВАЙ ПРИ ПОГРУЖЕНИИ ВДАВЛИВАНИЕМ

В.С. Глухов, О.В. Хрянина, Ю.Р. Янгуразов, К.О. Волков

Изучено напряжённо-деформированное состояние грунтового основания свайных фундаментов. На основе анализа известных практических решений, требующих больших затратных технологий, указаны новые методические конструктивные подходы. На примере свайного поля 18-этажного жилого дома рассмотрены сложное уплотненное состояние глинистого основания и природа его формирования. Выявлен новый методический подход для увеличения несущей способности сваи во времени при принудительном погружении по технологии вдавливания.

Ключевые слова: сваи, погружение вдавливанием, несущая способность, определение, методика

BEARING CAPACITY OF PILES IMMERSED BY INDENTATION

V.S. Glukhov, O.V. Khryanina, Yu.R. Yangurazov, K.O. Volkov

The stress-strain state of the soil base of pile foundations has been studied. Based on the analysis of well-known practical solutions that require high-cost technologies, new methodological constructive approaches are indicated. Using the example of a pile field of an 18-storey residential building, the complex compacted state of the clay base and the nature of its formation are considered. A new methodological approach has been identified to increase the bearing capacity of the pile over time during forced immersion using indentation technology.

Keywords: piles, indentation immersion, bearing capacity, definition, methodology

Введение. При оценке напряжённо-деформированного состояния грунтового основания свайных фундаментов важное значение имеют не только геометрические параметры свай, диапазон нагрузок на фундаменты, инженерно-геологические условия площадки строительства, но и технологические особенности устройства свай. Последнее особенно актуально в стесненных условиях городской застройки. Существующие

решения в большинстве своем базируются или на весьма затратных технологиях [1, 2], или на ударных методах погружения с использованием копровых установок [3]. Применение последнего метода ограничивается из-за неблагоприятных шумовых и динамических воздействий на городскую застройку и природную среду. Совершенствование существующих решений требует специального строительного оборудования, новых методов расчета и конструктивных подходов [4… 6].

Наиболее эффективными считаются сваи, погружение которых сопровождается вытеснением грунта. Указанное обусловливает улучшение строительных свойств околосвайного основания. Особенно актуально последнее для глинистых водонасыщенных грунтов, характерной особенностью которых является сложное уплотнение околосвайного основания свай вследствие фильтрационной консолидации. Авторами статьи указанный эффект исследован при совершенствовании технологии погружения свай вдавливанием на примере свайного поля 18-этажного жилого дома.

Проектом предусмотрено устройство свайного поля по технологии вдавливания, так как ближайшие здания находятся в пределах 12÷15 м от ограждения стенок котлована. Для уточнения длины составных свай проведено опытное погружение последних, в процессе которого фиксировались усилия вдавливания с интервалом два метра.

В результате анализа материалов инженерно-геологических изысканий площадки строительства в соответствии с ГОСТ 20522-12 и ГОСТ 25100-2020 выделено четыре инженерно-геологических элемента (ИГЭ):

- ИГЭ 1 – суглинок коричневый, твердый с прослоями полутвердого, непросадочный; мощность слоя 1,3÷7,3 м;
- ИГЭ 2 – суглинок коричневый, серовато-коричневый, тугопластичный, с прослоями мягкопластичного, с частыми прослоями песка пылеватого, непросадочный; мощность слоя 1,0÷14,0 м;
- ИГЭ 3 – суглинок серый, текучепластичный, с частыми прослоями песка; мощность слоя 1,8÷16,9 м;
- ИГЭ 4 – глина красновато-коричневая, серовато-коричневая, твёрдая, с прослоями полутвёрдой, с прослоями мергеля серого; мощность слоя 2,4÷12,4 м.

С поверхности во всех скважинах вскрыты почвенно-растительный грунт и техногенные отложения толщиной 0,4÷1,9 м. Данные отложения не рекомендуются в качестве естественного основания для фундаментов.

На момент проведения полевых работ (октябрь – ноябрь 2021 года) на территории вскрыты подземные воды всеми скважинами на глубинах 11,5÷16,4 м. Водоупором служит глина полутвердая пермских отложений (ИГЭ 4).

Известно, что при назначении длины сваи рекомендуется острие погружать в наиболее прочный слой. На рассматриваемой площадке в качестве основного несущего слоя основания принята глина твёрдая (ИГЭ 4) с физико-механическими характеристиками по табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические показатели грунтов

Инженерно-геологические элементы	Физико-механические показатели грунтов						
	W, %	I_L, д.е.	Sr, д.е.	e, д.е	E, МПа	φ, градус	c, кПа
ИГЭ 1	15,24	-0,08	0,75	0,549	24/20*	28/22*	31/25*
ИГЭ 2	22,60	0,48	0,93	0,662	14/13*	18/13*	19/20*
ИГЭ 3	27,15	0,90	0,98	0,754	8	14	15
ИГЭ 4	23,54	-0,01	1,00	0,623	6**	28	103

* В знаменателе указаны данные в водонасыщенном состоянии.

** Компрессионный модуль деформации.

С учётом вертикальной привязки здания расстояние от подошвы ростверка до указанного слоя составляет: минимальное – 21,0 м; максимальное – 24,0 м (расстояния различаются как по длине дома, так и в поперечном направлении).

Анализ существующих методов. Из опыта устройства конструкций свайных фундаментов [3, 4, 7, 8], в том числе погружаемых по технологии вдавливания, известно, что для пылевато-глинистых водонасыщенных грунтов несущая способность сваи повышается на 40 % с течением времени по мере «отдыха» после погружения. Указанное повышение обусловлено способностью уплотняться в результате перемещения свободной воды из напряженной зоны вокруг сваи. В результате проявляется процесс фильтрационной консолидации. Последний тем значительнее, чем выше глинистость водонасыщенного грунта. Согласно исследованиям Н.М. Герсеванова, В.А. Флорина и др., фильтрационная консолидация определяется консистенцией, зависящей от весовых свойств грунта, размеров и формы вязкого течения деформаций, а также геометрических граничных условий. Известные по К.Терцаги границы консистенции характеризуют состояние связных пылевато-глинистых грунтов (твёрдое, пластичное и текучее), поскольку только для последних присуще взаимное притяжение твердых частиц. Степень притяжения частиц грунта выражается всесторонним внутренним давлением связности, величина которого зависит от степени сближения частиц грунтового скелета, что обусловливает плотность (жесткость) грунта, а значит, и несущую способность свай [8].

Теоретические основы формирования грунтового основания. При погружении сваи в водонасыщенные грунты промежутки между частицами скелета заполнены водой, околосвайный грунт представляет собой жидкую бесформенную массу, и сопротивление грунта вдоль боковых граней и острия свай, минимизируется. Погружение сваи сопровождается фильтрацией свободной воды в направлении от уплотнённой области основания, то есть от сваи. Уменьшение количества воды способствует сближению частиц грунта, и начинает проявляться связность (консистенция). Сжатие грунта в околосвайной области завершается не сразу после погружения сваи. Указанное обусловлено медленным передвижением молекулярной воды, которая представляет собой «вязкое» тело [9].

По мере завершения процесса фильтрационной консолидации начинают развиваться реологические явления в уплотнённых областях околосвайного грунтового основания. Между сблизившимися частицами возникают силы притяжения N_e, и тем больше, чем теснее сдвинуты частицы. Поэтому реологические процессы не ведут к возвращению грунта в разуплотнённое состояние. Достаточно плотное состояние препятствует вклиниванию прежнего объёма молекулярной воды и возвращению частиц грунта к разуплотнённому водонасыщенному состоянию.

Отмеченные особенности деформации грунтов в достаточной мере подтверждаются опытным путём при компрессионных испытаниях, обеспечивающих свободное перемещение воды [10]. Ветвь зависимости деформации образца при загружении не совпадает с ветвью деформаций образца при разгрузке.

Уместно отметить, что модуль деформации E грунтового основания величина непостоянная и увеличивается по мере уплотнения грунта. Указанное обусловлено сближением частиц скелета грунта и образованием всё более вязких молекулярных оболочек.

Несущая способность грунтового основания существенным образом определяется консистенцией грунта, которая зависит от степени приближения влажности грунта к пределу пластичности или пределу текучести.

Вышеизложенные теоретические основы формирования околосвайного грунтового основания позволяют объяснить полученные авторами результаты исследований по оценке существенного увеличения несущей способности сваи во времени при принудительном погружении по технологии вдавливания.

Методика экспериментальных исследований. На основании предварительного анализа грунтовых условий с учётом характера напластований грунтов принято решение об опытном вдавливании 24 составных свай общей длиной 22 м и сечением 350х350 мм (табл. 2). Максимальное вдавливающее усилие, которое создавалось на завершающем этапе погружения, составляло 95,0÷97,0 тс. При указанном усилии

минимальная длина свай – 13,0 м, а максимальная – 21,0 м. Последнее позволяет подтвердить вывод о весьма сложном напластовании грунтов.

Таблица 2

Результаты вдавливания опытных составных свай

№ сваи	Длина, м	№ сваи	Длина, м	№ сваи	Длина, м	№ сваи	Длина, м
483	21,0	477	21,0	478	21,0	474	21,0
472	20,0	470	19,0	295	19,0	309	17,0
300	17,0	302	13,0	291	19,0	298	13,0
305	18,0	273	19,0	271	19,0	269	19,0
399	20,5	400	17,0	401	20,0	388	20,0
377	21,0	376	19,0	375	20,0	480	19,5

Погружение опытных свай осуществлялось сваевдавливающей установкой (СВУ) «Тайзер», способной создавать усилия в пределах 110,0 тс. Сваи составные, что обусловливает приостановку процесса вдавливания для сварки элементов сваи. Для сварки узла сопряжения требовалось 40÷45 мин. При погружении всех 24 свай отмечалось заметное увеличение усилия вдавливания по мере «отдыха» сваи в период проведения сварочных работ для сопряжения свай. Указанное увеличение составляло от 15 до 30 тс при усилии вдавливания до начала сварки $N_в$=55÷70 тс. Следовательно, указанное усилие после завершения сварочных работ возрастало в 1,27÷1,45 раза при длине сваи 12,0 м. Таким образом, для свай длиной 12,0 м и сечением 35,0×35,0 см для данных грунтовых условий удельное увеличение на 1,0 м длины усилия вдавливания составляет: min – 1,25 тс; max – 2,1 тс за 45,0÷60,0 мин стабилизации.

В ряде работ специалистов Санкт-Петербурга [4-6] рекомендуется в проектах приводить значения вдавливания, которые необходимо достигать при погружении свай для обеспечения требуемой расчётно-допускаемой нагрузки на сваю, указанной в проекте. На основе результатов экспериментальных исследований рекомендуемые эмпирические коэффициенты перехода конечного усилия вдавливания к несущей способности свай применяются в диапазоне 0,75÷1,1. Последние в основном зависят от состояния водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов околосвайного пространства.

Рекомендуется до начала массового погружения свай проводить статические испытания для объективного назначения в проекте контролируемого усилия вдавливания, которое требуется достичь на завершающем этапе погружения свай.

Несмотря на некоторую условность определения несущей способности сваи по результатам статических испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 5686-2020, полученные данные содержат элементы научной новизны и нашли практическое применение.

Авторы, исходя из опыта погружения свай вдавливанием на ряде площадок с глинистыми водонасыщенными грунтами, предложили провести испытание шести свай для уточнения длины свай. Фиксация контролируемого усилия на сваю на завершающем этапе вдавливания показала, что по мере «отдыха» сваи значительно увеличивается предельное сопротивление последней. Исходя из накопленного опыта и анализа напластования грунтов в ходе проведения статических испытаний проектные длины составных свай были уменьшены до 22,0 м.

На площадке строительства исследуемого объекта выполнены испытания призматических свай статической вдавливающей нагрузкой в соответствии с требованиями ГОСТ 5686-2020. Нагружение опытных свай производилось путем упора домкрата грузоподъёмностью 200,0 тс в грузовую платформу испытательного стенда ИС-1, закрепленного к анкерным сваям (рис. 1, 2). Контроль за перемещением опытной сваи вели с помощью двух прогибомеров с ценой деления не более 0,1 мм.

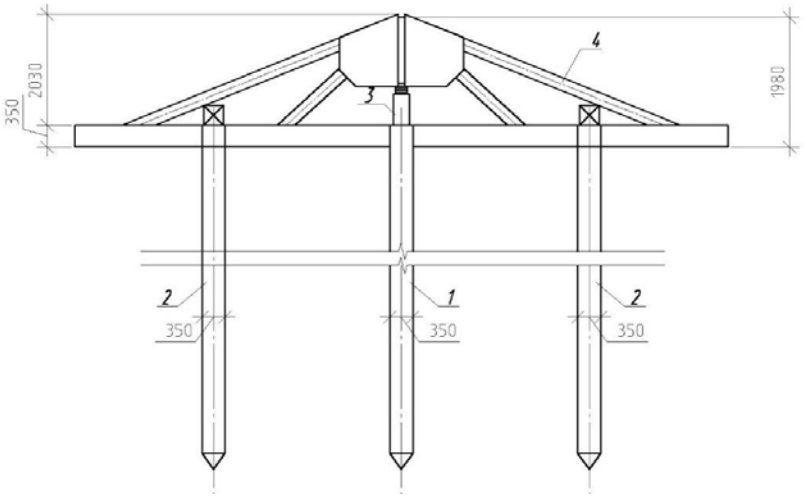


Рис. 1. Конструктивная схема испытания статической нагрузкой:
1 – испытываемая свая; 2 – анкерная свая; 3 – гидравлический домкрат;
4 – испытательный стенд ИС-1 (опорная конструкция)

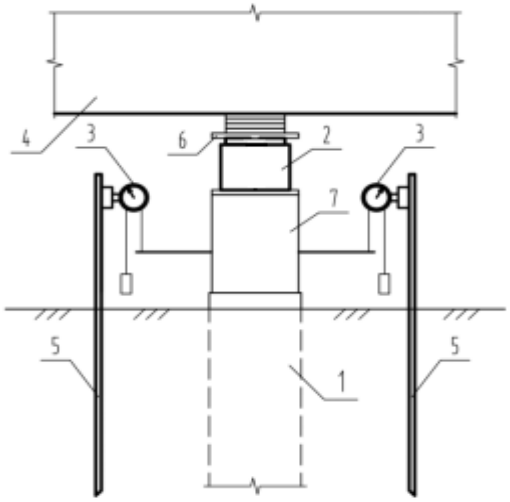


Рис. 2. Схема установки реперной системы:
1 – испытываемая свая; 2 – гидравлический домкрат с манометром; 3 – прогибомеры;
4 – испытательный стенд (опорная конструкция); 5 – реперная система из стальных швеллеров и арматуры; 6 – груз (для упора домкрата); 7 – монолитный оголовок

Полученные результаты. Согласно ГОСТ 5686-2020, испытание свай требуется вести до нагрузки, превышающей расчетно-допустимую в 1,5 раза, или общей осадки сваи свыше 40 мм. При меньших осадках продолжительность выдержки сваи под нагрузкой на последней ступени нагружения, даже в случае достижения принятой условной стабилизации, должна составить 5,0 часов.

По результатам испытаний шести свай за частное значение предельного сопротивления свай F_u (кН) вдавливающей нагрузке принимаем нагрузку, под воздействием которой фундамент получит осадку S, равную:

$$S = \zeta \cdot S_{u,mt}, \quad (1)$$

где $S_{u,mt}$ – предельное значение средней осадки фундамента проектируемого здания, принимаемой согласно СП 22.13330.2016 равной 150,0 мм; ζ – коэффициент перехода от предельного значения средней осадки фундамента здания или сооружения к осадке сваи, полученной при статических испытаниях с условной стабилизацией (затуханием) осадки, составляет 0,2 согласно СП 24.13330.2021;

$$S = 0{,}2 \cdot 150{,}0 = 30{,}0 \text{ мм}.$$

При статическом испытании сваи № 261 при указанной в проекте расчетно-допускаемой нагрузке 1100,0 кН была достигнута осадка 7,0 мм. Максимально возможное усилие в домкрате без «срыва» осадки сваи составило 1600,0 кН.

Согласно СП 24.13330.2021, за частное значение несущей способности принимаем максимальную нагрузку, полученную при испытаниях свай. Таким образом,

$$F_d = 1600{,}0 \text{ кН}.$$

Расчетно-допускаемая нагрузка на фундамент по грунту основания определяется по формуле СП 24.13330.2021:

$$\gamma_n * N_{\text{р.д.}} \le \frac{F_d}{\gamma_n \cdot \gamma_{c,g}}, \quad (2)$$

где F_d – несущая способность сваи, равная 1600,0 кН; γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый по ГОСТ 27751-2014, для класса сооружения КС-2 нормального уровня ответственности равный 1,0; $\gamma_{c,g}$ – коэффициент надежности по грунту, принимаемый равным 1,2, т.к. несущая способность сваи определена по результатам полевых испытаний статической нагрузкой.

Следовательно, расчетно-допускаемая нагрузка на фундамент составит:

$$N_{\text{р.д.}} \le \frac{1600{,}0}{1{,}0 \cdot 1{,}2} \approx 1300{,}0 \text{ кН}.$$

В проекте расчетно-допускаемая нагрузка на сваю 1100,0 кН. Из опыта погружения свай по технологии вдавливания в аналогичных грунтах известно, что по мере «отдыха» сваи после вдавливания сопротивление последней существенно возрастает в пределах 15÷30 % от величины контролируемого усилия. Поэтому при погружении опытных свай вдавливанием решалась задача достижения контролируемой нагрузки на сваю N_k не менее 950,0 кН. Проведены опытные работы по погружению 24 свай длиной 22,0 м. В процессе контролировалось усилие вдавливания на каждый метр погружения. Статические испытания свай проводились после «отдыха». Продолжительность «отдыха» свай в данных грунтовых условиях составляла не менее 20 суток, что обусловлено наличием в пределах длины свай слоев мягкопластичных пылевато-глинистых грунтов.

Испытано шесть свай. Согласно ГОСТ 5686-2020 несущая способность шести свай независимо от глубины погружения составляет 1620,0 кН. Расчетно-допускаемая нагрузка на сваю 1160,0 кН, при значении расчетной нагрузки 1100,0 кН. По результатам испытаний и опытного вдавливания 24 свай рекомендовано уменьшить длину свай до 22,0 м.

Замена проектного решения на более короткие сваи позволяет снизить сметную стоимость устройства свайного поля на 6500 тыс. руб с обеспечением требуемой надежности фундаментов.

Выводы:

1. Предложен методический подход при определении несущей способности свай по контролируемому усилию вдавливания в сложных грунтовых условиях с учетом процессов фильтрационной консолидации слабых грунтов.
2. На основании результатов статических испытаний свай выявлен диапазон применимых коэффициентов вдавливания для определения несущей способности свай в слабых грунтах, что дает возможность корректировать проектные решения без ущерба надежности.
3. На примере 18-этажного жилого здания требования проекта по обеспечению надёжности свайных фундаментов, исходя из расчётно-допускаемой нагрузки, соблюдены полностью. Имеется существенный запас по допустимой нагрузке на сваи в пределах 18-36 % по сравнению с расчётной нагрузкой согласно проекту.
4. При выборе вариантов фундаментов следует обращать внимание на их конструктивные особенности. Конструкция фундамента самым существенным образом

влияет на несущую способность по грунту основания. Наряду с конструктивными особенностями фундамента имеют значение технологические особенности устройства свай. Разработан алгоритм технологической последовательности оценки контролируемого усилия вдавливания.

Список литературы

1. Глухов, В.С. Свайно-плитные фундаменты на комбинированном основании / В.С. Глухов, О.В. Хрянина, М.В. Глухова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического ун-та: Строительство и архитектура. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. – №2. – С. 229–237.

2. Глухов, В.С. Исследования влияния уширения свай в пробитых скважинах на осадку / В.С. Глухов, О.В. Хрянина, М.В. Глухова // Известия Юго-Западного гос. ун-та. – Курск, 2011. – №5 [38]. – Ч. 2. – С. 351–354.

3. Пономарев, А.Б. Несущая способность забивных свай в слабых водонасыщенных грунтах с учетом фактора времени / А.Б. Пономарев, М.А. Безгодов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического ун-та: Строительство и архитектура. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. – №1. – С. 7–15.

4. Полищук, А.И. Совершенствование способа устройства свай вдавливанием на площадках городской застройки / А.И. Полищук, С.С. Нуйкин // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3. – С. 52–59.

5. Патент №2206664 РФ, 7Е 02Д 7/20. Установка для погружения свай вдавливанием / Ющубе С.В., Полищук А.И., Андриенко Ю.Б., Нуйкин С.С.: заявлено 29.08.2001; зарегистрировано 20.06.2003. Бюл. № 17.

6. Савинов, А.В. Повышение эффективности применения свай, погружаемых вдавливанием, в условиях плотной городской застройки / А.В. Савинов // Вестник СГТУ. Архитектура и строительство. – 2006. – № 3(15). – С. 94–100.

7. Глухов, В.С. Рекомендации по определению несущей способности свай при погружении вдавливанием / В.С Глухов, Ю.С. Вишнякова // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 3(40). – С. 107–112.

8. Глухов, В.С. Формирование околосвайного грунтового основания / В.С. Глухов, М.В. Панкина, Ю.С. Вишнякова // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №4(57). – С.122–126.

9. Moreno-Maroto, J.M. An accurate, quick and simple method to determine the plastic limit and consistency changes in all types of clay and soil: The thread bending test / J.M. Moreno-Maroto, J. Alonso-Azcárate // Applied Clay Science. – 2015. – Vol. 114. – P. 497–508.

10. Mirsayapov, I.T. Changes in physical and mechanical characteristics of soil under triaxial loading / I.T. Mirsayapov, I.V. Koroleva // Geotechnics fundamentals and applications in construction: new materials, structures, technologies and calculations, 6–8 Feb. – Saint Petersburg, 2019. – P. 193–196. – DOI: 10.1201/9780429058882-3.

References

1. Glukhov, V.S. Pile-slab foundations on a combined base / V.S. Glukhov, O.V. Khryanina, M.V. Glukhova // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University: Construction and Architecture. – Perm: PNRPU Publishing House, 2014. – No. 2. – P. 229–237.

2. Glukhov, V.S. Studies of the effect of pile broadening in punched wells on sediment / V.S. Glukhov, O.V. Khryanina, M.V. Glukhova // Izvestia of the Southwestern State University. – Kursk, 2011. – №5 [38]. – Part 2. – P. 351–354.

3. Ponomarev, A.B. Bearing capacity of driven piles in weak water-saturated soils, taking into account the time factor / A.B. Ponomarev, M.A. Bezgodov // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University: Construction and Architecture. – Perm: PNRPU Publishing House, 2014. – No.1. – P. 7–15.

4. Polishchuk, A.I. Improving the method of installing piles by indentation on urban development sites / A.I. Polishchuk, S.S. Nuikin // Bulletin of PNRPU. Construction and architecture. – 2014. – No. 3. – P. 52–59.

5. Patent No.2206664 of the Russian Federation, 7E 02D 7/20. Installation for sinking piles by indentation / Yushchube S.V., Polishchuk A.I., Andrienko Yu.B., Nuikin S.S.: announced 08/29/2001; registered 06/20/2003. Byul. No. 17.

6. Savinov, A.V. Improving the efficiency of using piles immersed by indentation in conditions of dense urban development / A.V. Savinov // Bulletin of the SSTU. Architecture and construction. – 2006. – № 3(15). – P. 94–100.

7. Glukhov, V.S. Recommendations for determining the bearing capacity of piles during indentation / V.S. Glukhov, Yu.S. Vishnyakova // Regional architecture and engineering. – 2019. – № 3(40). – P. 107–112.

8. Glukhov, V.S. Formation of a near-pile soil base / V.S. Glukhov, M.V. Pankina, Yu.S. Vishnyakova // Regional architecture and engineering. – 2023. – No.4(57). – P.122–126.

9. Moreno-Maroto, J.M. An accurate, quick and simple method to determine the plastic limit and consistency changes in all types of clay and soil: The thread bending test / J.M. Moreno-Maroto, J. Alonso-Azcárate // Applied Clay Science. – 2015. – Vol. 114. – P. 497–508.

10. Mirsayapov, I.T. Changes in physical and mechanical characteristics of soil under triaxial loading / I.T. Mirsayapov, I.V. Koroleva // Geotechnics fundamentals and applications in construction: new materials, structures, technologies and calculations, 6–8 Feb. – Saint Petersburg, 2019. – P. 193–196. – DOI: 10.1201/9780429058882-3.

УДК 531.3.534.17 DOI 10.54734/20722958_2024_3_74

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
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Зайцев Михаил Борисович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Механика»
E-mail: zaisev.mihail2011@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

Shein Aleksandr Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Zaitsev Mihail Borisovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Mechanics»
E-mail: zaisev.mihail2011@yandex.ru

Статья подготовлена при поддержке гранта РНФ №N 23-29-00653 «Разработка способов гашения колебаний куполообразующих и прямоугольных каркасов зданий и сооружений».

ЧАСТОТНО-ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗ СЕРИИ ОДНОТИПНЫХ ЗДАНИЙ РАЗНОЙ ЭТАЖНОСТИ

А.И. Шеин, М.Б. Зайцев

Исследуются основные динамические характеристики высотного сооружения – частоты и формы собственных колебаний. Анализируется чувствительность частот в зависимости от высоты здания, размеров в плане и размеров сечений отдельных конструктивных элементов: колонн, ядра жесткости и плит перекрытий. Оценивается характер перемещений на этих частотах (формы колебаний) для рационального расположения гасителей колебаний. Представлена математическая модель каркасно-ствольного высотного здания на основе МКЭ, реализующая решение системы однородных алгебраических уравнений свободных колебаний пластинчато-стержневой системы с помощью программного комплекса. Разработано программное средство для анализа динамических характеристик высотного здания, позволяющее оценивать чувствительность частот собственных колебаний в зависимости от геометрических параметров пластинчато-стержневой математической модели. Получены значения коэффициентов влияния (компоненты вектора градиента) частот собственных колебаний, на основании которых можно судить о том, жесткости каких элементов в большей степени влияют на величины частот.

Ключевые слова: высотное здание, собственная частота, формы колебаний, конечный элемент, вектор градиент, коэффициент влияния

FREQUENCY-VECTOR ANALYSIS OF A SERIES OF SIMILAR BUILDINGS OF DIFFERENT STOREYS

A.I. Shein, M.B. Zaitsev

The main dynamic characteristics of a high-rise structure – the frequency and shape of natural vibrations – are investigated. The sensitivity of frequencies is analyzed depending on the height of the building, the dimensions in plan and the cross-sections of individual structural elements: columns, cores of rigidity and floor slabs. The nature of the movements at these frequencies (waveforms) is estimated for the rational arrangement of vibration dampers. A mathematical model of a frame-trunk high-rise building based on FEM is presented, which implements the solution of a system of homogeneous algebraic equations of free vibrations of a plate-rod system using a software package. A software tool has been developed for analyzing the dynamic characteristics of a high-rise building, which allows evaluating the sensitivity of natural vibration frequencies depending on the geometric parameters of a plate-rod mathematical model. The values of the coefficients of influence (components of the gradient vector) of natural oscillation frequencies are obtained, on the basis of

which it is possible to judge which stiffness elements have a greater influence on the frequency values.

Keywords: high-rise building, natural frequency, waveforms, finite element, gradient vector, coefficient of influence

Введение

При проектировании высотных зданий после назначения физико-геометрических характеристик конструктивной системы необходимо выполнить динамический анализ для выявления диапазона возможных вариаций отклика конструкции на переменные нагрузки и воздействия. Этот анализ состоит прежде всего в вычислении двух основных естественных спектральных свойств конструктивной системы: величин 5-6 собственных частот и характера перемещений на этих частотах, т.е. собственно-векторных изображений деформированных схем сооружения [1, 2].

Данный анализ необходим и при решении задачи гашения колебаний высотного здания для правильной (оптимальной) установки гасителей и назначении направлений их воздействий [3-5]. Кроме того, этот подход позволяет внести корректировки в конструктивное решение несущей системы здания на этапе проектирования.

Предмет, задачи и методы

Исследуемые здания – регулярные многоярусные этажерки, представляющие собой в плане квадрат со стороной *b*, размер которой принимался в трех вариантах: 1) 18 м; 2) 24 м; 3) 30 м. Для каждого варианта рассматривались здания высотой *h*, равной 60 м, 90 м, 120 м и 150 м. Высота этажа – 3 м (рис.1, а-б).

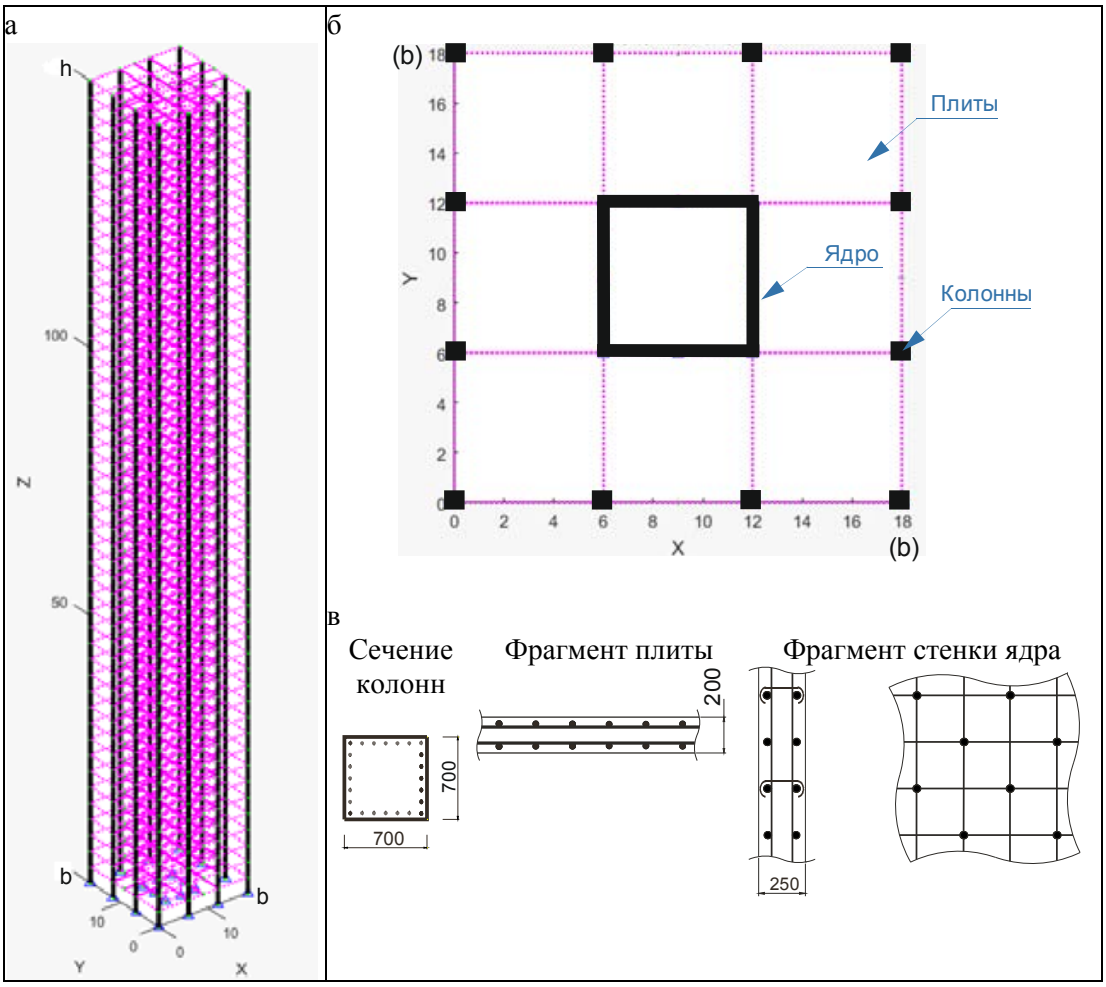


Рис. 1. Расчетная схема высотного здания:
а – конечно-элементная модель; б – схема расстановки колонн и ядра;
в – схемы армирования конструкций

Конструктивная схема здания – каркасно-ствольная, с центральным железобетонным ядром (стволом) жесткости, сечением 6×6 м и толщиной стенки 250 мм. Стенки ядра армированы сетками из стержневой стали Ø12 А400. Шаг стержней сетки – 200 мм.

Колонны каркаса сечением 700×700 мм армированы рабочей стержневой арматурой Ø32 А400. Шаг стержней – 100 мм. Сетка колонн – 6×6 м.

Монолитные железобетонные плиты перекрытий (покрытия) толщиной 200 мм армированы сетками из стержневой стали Ø10 А400. Шаг стержней сетки – 200 мм.

В вертикальных несущих железобетонных конструкциях (колонны и ядро жесткости) принят тяжелый бетон класса В45, в перекрытиях – тяжелый бетон класса В30.

Схемы армирования конструкций здания представлены на рис.1, в.

Для выполнения исследования авторами разработано программное средство в среде «MatLab», реализующее решение системы однородных алгебраических уравнений свободных колебаний пластинчато-стержневой системы

$$\left|M^{-1}K-\lambda E\right|=0, \tag{1}$$

путем отыскания собственных значений $\lambda_i = \omega_i^2$ матрицы $M^{-1}K$, где ω_i – i-я частота спектра частот собственных колебаний; M – диагональная матрица масс; K – матрица жесткости конечно-элементной модели пластинчато-стержневой системы (см. рис. 1, а).

Для моделирования высотного здания при расчете использовались стержневой пространственный КЭ (колонны каркаса) в совокупности с прямоугольным КЭ тонкой пластины (плиты перекрытий и стенки ядра жесткости) с шестью степенями свободы, три линейных и три угловых перемещения в узле.

При анализе влияния изгибной жесткости отдельного КЭ пластинчато-стержневой системы на величины частот собственных колебаний использовалось понятие вектора градиента частоты по жесткостям элементов:

$$\nabla\Omega=\left[\frac{\partial\omega}{\partial i_k}=f_k\right]^{\mathrm{T}}\quad (k=1,\,2,\,3\ldots m), \tag{2}$$

где $i_k = EI_k$ – изгибная жесткость k-го элемента; f_k – коэффициенты влияния (компоненты вектора градиента).

Определитель (1) в развернутом виде имеет вид:

$$\begin{vmatrix} m_1^{-1}r_{11}-\lambda_i & m_2^{-1}r_{12} & .... & m_n^{-1}r_{1n} \\ m_1^{-1}r_{21} & m_2^{-1}r_{22}-\lambda_i & .... & m_n^{-1}r_{2n} \\ .... & .... & .... & .... \\ m_1^{-1}r_{n1} & m_2^{-1}r_{n2} & .... & m_n^{-1}r_{nn}-\lambda_i \end{vmatrix}=0,$$

или

$$\lambda^n+B_1\lambda^{n-1}+B_2\lambda^{n-2}+\ldots+B_{n-1}\lambda+B_n=0. \tag{3}$$

Представив выражение (3) неявной функцией вида

$$\begin{aligned} F(\omega,i_1,i_2,\ldots,i_m)&=\left(\omega^2\right)^n+B_1(i_1,i_2,\ldots,i_m)\left(\omega^2\right)^{n-1}+\\ &+B_2(i_1,i_2,\ldots,i_m)\left(\omega^2\right)^{n-2}+\ldots+B_n(i_1,i_2,\ldots,i_m)=0, \end{aligned} \tag{4}$$

можно получить компоненты вектора градиента

$$f_k=\frac{\partial\omega}{\partial i_k}=-\frac{\partial F(\omega,i_1,i_k,\ldots,i_m)\big/\partial i_k}{\partial F(\omega,i_1,i_k,\ldots,i_m)\big/\partial\omega}. \tag{5}$$

Сравнивая значения f_k при заданном соотношении жесткостей и найденных по (1) частот, можно судить о том, жесткости каких элементов в большей степени влияют на величину частот собственных колебаний. Варьирование жесткости элементов с малыми величинами f_k будет мало влиять на изменение значений частот, и, соответственно, наоборот.

В ходе исследований определялось влияние основных геометрических параметров высотного здания (размеры в плане и высота) на спектральные свойства системы, а также оценивалось влияние изгибных жесткостей отдельных КЭ на эти свойства.

Результаты исследований и обсуждение

1. ***Анализ форм колебаний в зависимости от размеров здания***

С помощью программного средства были получены формы колебаний здания высотой 60, 90, 120 и 150 м при различных размерах здания в плане. Характерные перемещения на низших частотах представлены на рис.2.

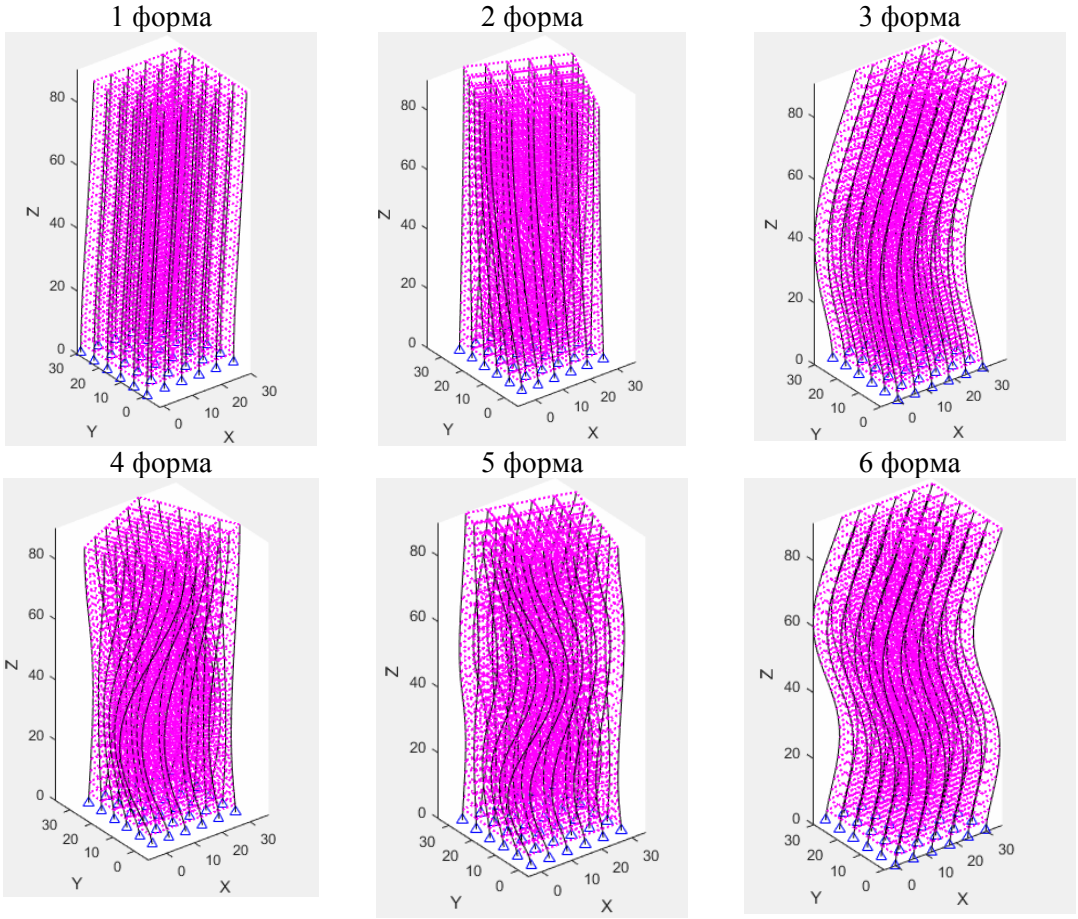


Рис. 2. Формы колебаний здания высотой 90 м (размер в плане 30×30 м)

По полученным результатам можно сделать вывод, что для более эффективной работы гасителей колебаний их целесообразно размещать в двух уровнях: 1-й уровень – покрытие высотного здания (1-я форма колебаний), 2-й уровень – средняя треть его высоты (3-я форма колебаний).

2. ***Анализ частот собственных колебаний***

2.1. Зависимость частот от габаритных размеров здания

С использованием разработанного программного комплекса были получены зависимости частот собственных колебаний здания от его высоты и размеров в плане. Характерные фрагменты полученных результатов для первых 6 частот представлены на рис. 3, 4.

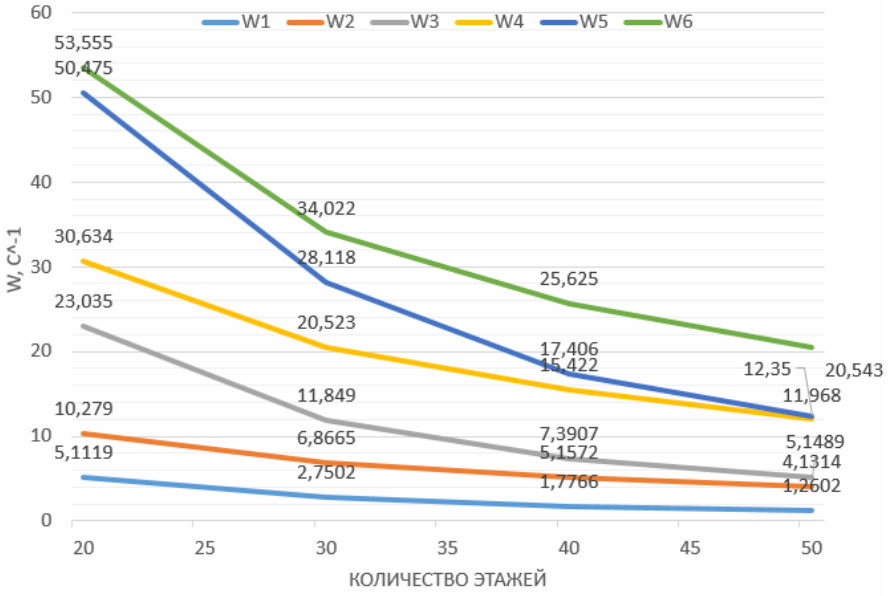


Рис. 3. Зависимости частот от высоты здания (размер в плане 18×18 м)

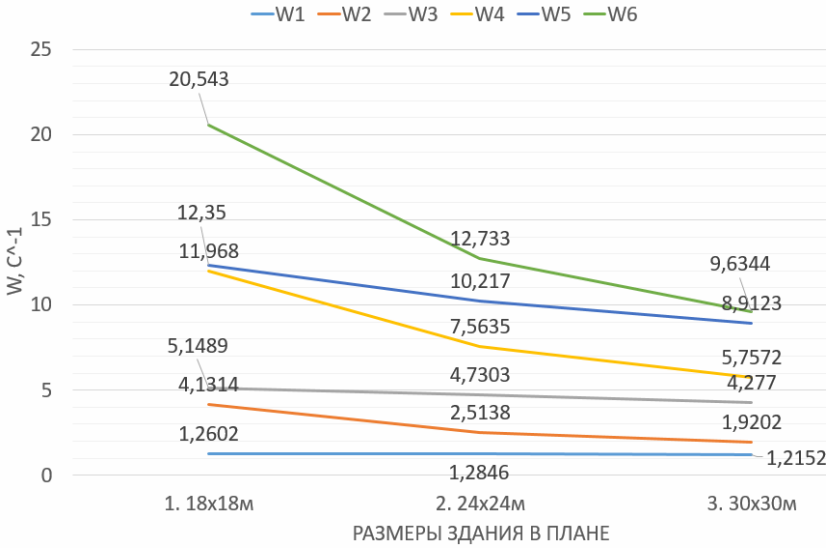


Рис. 4. Зависимости частот от размеров здания в плане (высота 150 м)

Результаты показывают, что при увеличении высоты здания частоты уменьшаются, что достаточно очевидно. Однако при увеличении размеров в плане частоты также уменьшаются, и это говорит о том, что наибольшее влияние на жесткость здания оказывает конструкция ядра (ствола) жесткости.

2.2. Зависимость частот от жесткости конструктивных элементов здания

Программное средство позволяет строить графики зависимости частот как функции одной переменной от размеров сечений отдельных конструктивных элементов: колонн, стенок ядра жесткости и плит перекрытий.

На рис. 5 представлены характерные графики этих зависимостей при различных габаритных размерах здания.

3. *Определение вектора градиента частоты собственных колебаний*

Программное средство также предусматривает построение табличных функций частот собственных колебаний как функции нескольких переменных (жесткостей отдельных КЭ пластинчато-стержневой системы).

Графики полученных функций частоты основного тона для здания высотой 150 м и размерами в плане 18×18 м в зависимости от 2 переменных в различных комбинациях представлены на рис. 6.

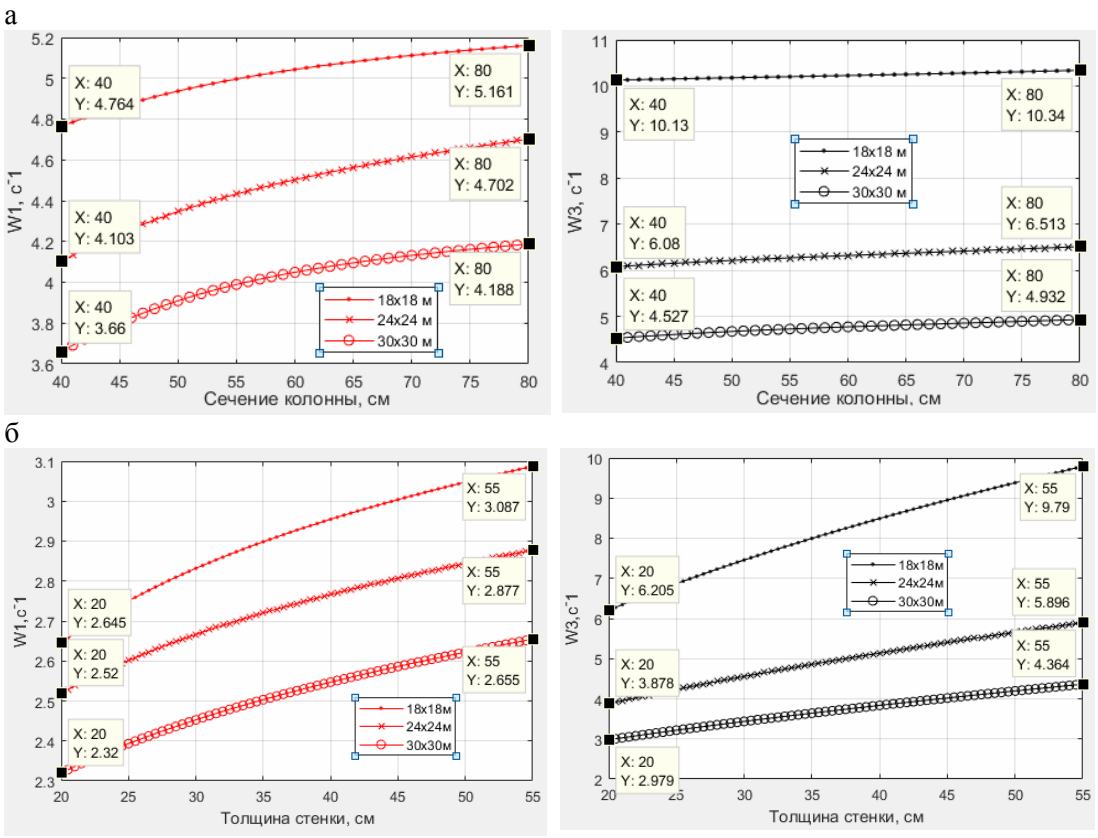


Рис. 5. Зависимости частот от размеров сечений отдельных элементов:
а – при высоте 60 м (колонны); б – при высоте 90 м (стенка ядра)

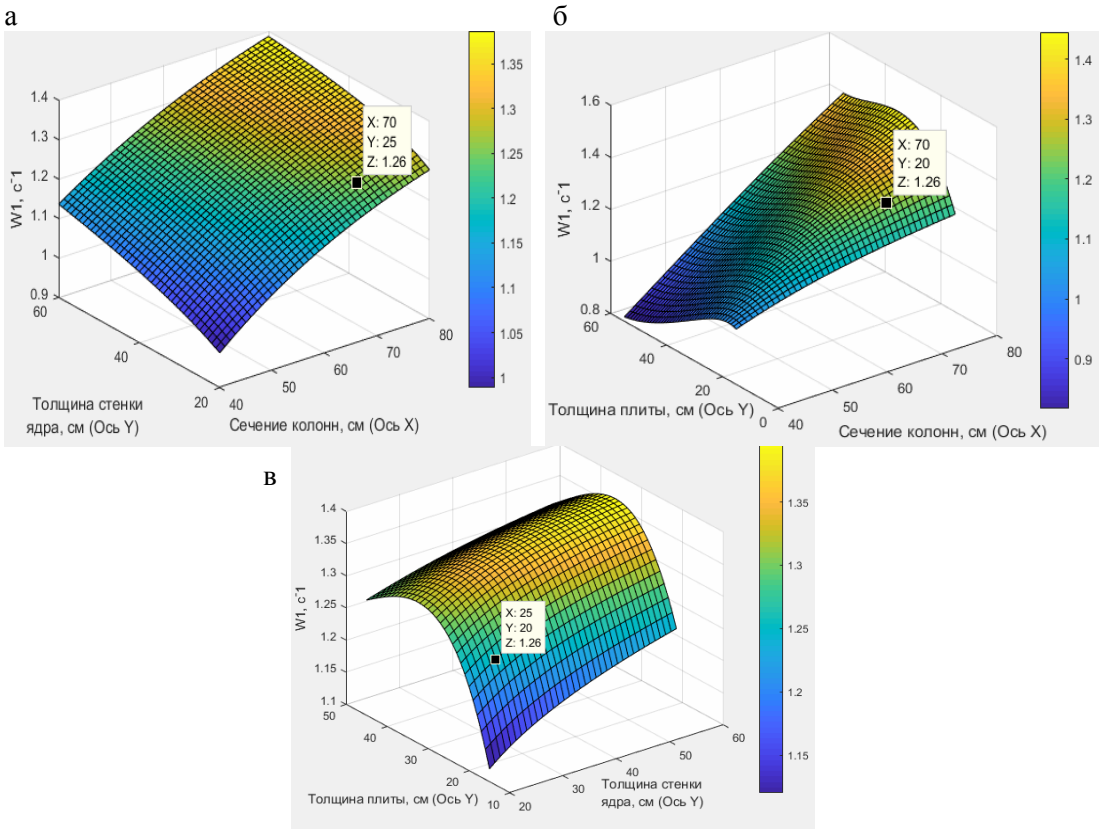


Рис. 6. График аналитической функции 1-й частоты (функция 2 переменных):
а – переменные – сечение колонн и стенки ядра; б – переменные – сечение колонн и плит перекрытий; в – переменные – сечение стенки ядра и плит перекрытий

Построив табличную функцию частот колебаний как функцию трех переменных (размеры сечений колонн, стенок ядра жесткости и плит перекрытий) и сконструировав интерполяционные сплайны, получим аналитическую функцию (4) в явном виде. Значения компонент вектора градиента в заданной точке по (5) определим с помощью оператора ***gradient*** среды «MATLAB». Эти значения для частоты основного тона представлены в таблице.

Значения коэффициентов влияния 1-й частоты

	Высота здания			
	60 м	90 м	120 м	150 м
	Компоненты вектора градиента, f_i			
Колонны	0.0082	0.004	0.0031	0.0024
Плиты перекрытий	0.0058	0.0055	0.003	0.0025
Ядро жесткости	**0.0157**	**0.0101**	**0.0044**	**0.0026**

Выводы

Проведено численное исследование частот и формы собственных колебаний высотного сооружения с помощью разработанного в среде «MATLAB» программного средства. Получены значения коэффициентов влияния (компоненты вектора градиента) частот собственных колебаний, которые показывают, что наибольшее влияние на значения собственных частот здания оказывает сечение стенок ядра жесткости. Указаны места наиболее эффективной установки гасителей колебаний.

Список литературы

1. Зернов, В.В. Определение вектора градиента частот собственных колебаний плоских стержневых систем / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, В.А. Валякин // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 4(25). – С. 88–92.

2. Цыкина, А.С. Исследование зависимости частот собственных колебаний здания от высоты здания в среде Autodesk Robot Structural 2019 / А.С. Цыкина, В.П. Ярцев // Вестник науки и образования. – 2023. – № 12-2(143). – С. 72–78.

3. Шеин, А.И. Гашение сейсмических колебаний сооружений башенного типа с помощью реактивного гасителя / А.И. Шеин, М.Б. Зайцев // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 4(23). – С. 171–176. – DOI 10.51608/26867818_2023_4_171.

4. Шеин, А.И. Активные гасители колебаний зданий и сооружений, работающие на принципе реактивной струи / А.И. Шеин, М.Б. Зайцев, А.В. Чуманов, О.Г. Земцова // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2(55). – С. 63–68. – DOI: 10.54734/20722958_2023_2_63.

5. Шеин, А.И. Математическое моделирование работы реактивного гасителя колебаний башни градирни / А.И. Шеин, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2023. – № 17. – С. 1–10.

References

1. Zernov, V.V. Determination of the gradient vector of natural oscillation frequencies of flat rod systems / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, V.A. Valyakin // Regional architecture and engineering. – 2015. – № 4(25). – P. 88–92.

2. Tsykina, A.S. Investigation of the dependence of the frequencies of natural vibrations of a building from the height of a building in the Autodesk Robot Structural environment 2019 / A.S. Tsykina, V.P. Yartsev // Bulletin of Science and Education. – 2023. – № 12–2(143). – P. 72–78.

3. Shein, A.I. Damping of seismic vibrations of tower-type structures using a reactive extinguisher / A.I. Shein, M.B. Zaitsev // Expert: theory and practice. – 2023. – № 4(23). – P. 171–176. – DOI 10.51608/26867818_2023_4_171.

4. Shein, A.I. Active vibration dampers of buildings and structures operating on the principle of a jet jet / A.I. Shein, M.B. Zaitsev, A.V. Chumanov, O.G. Zemtsova // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 2(55). – P. 63–68. – DOI: 10.54734/20722958_2023_2_63.

5. Shein, A.I. Mathematical modeling of the operation of a reactive vibration dampener of a cooling tower / A. I. Shein, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2023. – No. 17. – P. 1–10.

УДК 624.042.8(035.3) DOI 10.54734/20722958_2024_3_81

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
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Чуманов Александр Васильевич,
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Механика»

Зайцев Михаил Борисович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика»
E-mail: zaisev.mihail2011@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

Shein Aleksandr Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Chumanov Aleksander Vasilyevich,
Candidate of Sciences, Senior Lecturer of the Department «Mechanics»

Zaitsev Mihail Borisovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Mechanics»
E-mail: zaisev.mihail2011@yandex.ru

Статья подготовлена при поддержке гранта РНФ ºN 23-29-00653 «Разработка способов гашения колебаний куполообразующих и прямоугольных каркасов зданий и сооружений».

ТРИ НОВЫХ СПОСОБА ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

А.И. Шеин, А.В. Чуманов, М.Б. Зайцев

Приводится описание трех новых способов гашения колебаний зданий и сооружений, разработанных в ПГУАС. В качестве математических моделей и программных приложений рассматривается гашение колебаний пространственных стержневых и пластинчато-стержневых систем, которые могут быть приведены к системам с дискретными массами. Полагается, что механические колебания конструкций вызываются стационарными и нестационарными воздействиями природного и техногенного характера, включая действие нерегулярных импульсов. Рассматриваются три типа устройств гашения колебаний пассивного, полуактивного и активного типов: I − ленточно-тросовый гаситель с регулируемым натяжением, предназначенный в основном для гашения низкочастотных воздействий; II − пластические накладки (для гашения как высокочастотных, так и широкополосных колебаний); III − реактивные системы с газовой струей высокого давления, работающие в активном режиме.

Анализируются результаты использования каждого из способов гашения колебаний.

Ключевые слова: ленточно-тросовый гаситель, гидроцилиндр одностороннего действия, пластические накладки, демпфирование, реактивный гаситель, сейсмическое воздействие

THREE NEW WAYS OF DAMPING VIBRATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES

A.I. Shein, A.V. Chumanov, M.B. Zaitsev

The description of three new methods of damping vibrations of buildings and structures developed at the PSUAS is given. Damping vibrations of spatial rod and plate-rod systems, which can be reduced to systems with discrete masses, is considered as mathematical models and software applications. It is believed that mechanical vibrations of structures are caused by stationary and non-stationary effects of natural and man-made nature, including the action of irregular pulses. Three types of vibration damping devices of passive, semi−active and active types are considered: I – a tape−cable damper with adjustable tension, designed mainly for damping low−frequency effects; II – plastic pads (for damping both high-frequency and broadband vibrations); III – reactive systems with a high-pressure gas jet operating in active mode.

The results of using each of the vibration damping methods are analyzed.

Keywords: band-rope dampener, single-acting hydraulic cylinder, plastic pads, damping, reactive dampener, seismic impact

Описываются три новых способа гашения колебаний зданий и сооружений, разработанных в ПГУАС. В качестве математических моделей и программных приложений рассматривается гашение колебаний пространственных стержневых и пластинчато-стержневых систем, которые могут быть приведены к системам с дискретными массами. Полагается, что механические колебания конструкций вызываются стационарными и нестационарными воздействиями природного и техногенного характера, включая действие нерегулярных импульсов.

Принцип предварительного напряжения в виброизоляции рассматривался в работах Б.Г. Коренева [1], в которых отмечено повышенное рассеяние энергии в виброизоляторах с предварительно напряженной связью.

Результаты аналитических исследований задач колебания систем при действии импульсов произвольной формы представлены в многочисленных публикациях А.В. Дукарта [2], в которых рассматривается эффективный математический аппарат, разработанный на основе использования разложений решения в ряды по собственным формам колебаний. Предлагаемые в данной работе гасители могут быть успешно применены для предотвращения колебаний больших амплитуд и малоцикловой усталости зданий и сооружений. Как отмечается в [3], разрушение зданий, например, при сейсмических воздействиях происходит еще в дорезонансных областях за счет развития усталостных деформаций в конструкциях здания.

Рассматриваются три типа устройств гашения колебаний пассивного, полуактивного и активного типов:

I − ленточно-тросовый гаситель с регулируемым натяжением, предназначенный в основном для гашения низкочастотных воздействий. Полуактивная система гашения;

II − пластические накладки (для гашения как высокочастотных, так и широкополосных колебаний). Пассивная система демпфирования;

III − реактивные системы с газовой струей высокого давления, работающие в активном режиме. Активная система гашения колебаний.

I. Ленточно-тросовый гаситель с регулируемым натяжением является одной из разновидностей ограничителей. В отличие от известных решений в защищаемую систему включена лента (трос) с регулируемым предварительным натяжением и гидроцилиндром одностороннего действия. Здесь следует отметить следующие моменты:

- В данном случае преднапряжение передается непосредственно на защищаемую конструкцию и, кроме энергетических потерь в гидроцилиндре, вызывает рост диссипативных сил непосредственно в ней.
- Предварительное регулируемое натяжение лент сглаживает неизбежные рывки, связанные с ослаблением натяжения лент за счет деформации защищаемой конструкции. Кроме того, здесь существенное значение имеет быстрая работа возвратной пружины гидроцилиндра, также реализующая механизм слежения за изменяющейся внешней нагрузкой. С математической точки зрения ленточно-тросовый гаситель создает периодические импульсы заданной формы.
- Включение в конструкцию преднапряженной связи (ленты) повышает жесткость системы и смещает частоту воздействия в дорезонансную область. Таким образом, можно говорить о разработке устройств гашения колебаний в дорезонансных областях.
- Обычные стальные перекрестные связи, широко применяемые в промышленном и гражданском строительстве, не обладают достаточной прочностью и жесткостью для восприятия нагрузок, возникающих при землетрясении от воздействия существенной сейсмической волны и инерционного движения большой массы покрытия. Хорошую работу в этом случае показывает система перекрестных связей на основе ленточно-тросовых гасителей с гидроцилиндрами одностороннего действия. Т.е. поршневые гидроцилиндры одностороннего действия, работающие в системе перекрестных связей, удобны для использования в системах управления колебательными движениями.

В численных экспериментах конструкцию подвергали сейсмическому воздействию, соответствующему землетрясению в г. Газли (Узбекистан) в 1976 г. [5]. Исследовались колебания купола (рис. 1). Варианты установки тросов показаны на

рис.2. Результаты расчетов приведены на рис. 3. До момента времени 4,31 с при относительно малых перемещениях для всех трех вариантов установки гасителей наблюдается небольшое гашение колебаний (до 15 %).

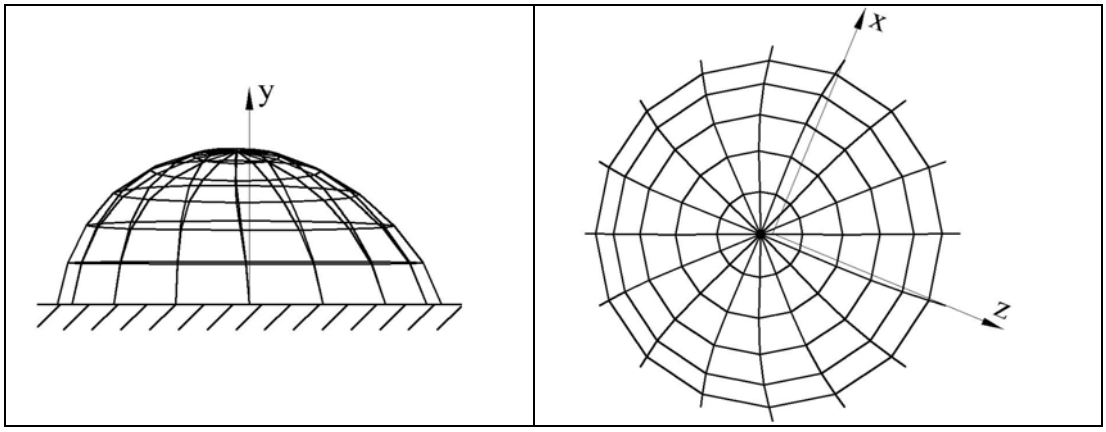


Рис. 1. Форма колебаний купола при сейсмическом воздействии
(масштаб перемещений 5:1)

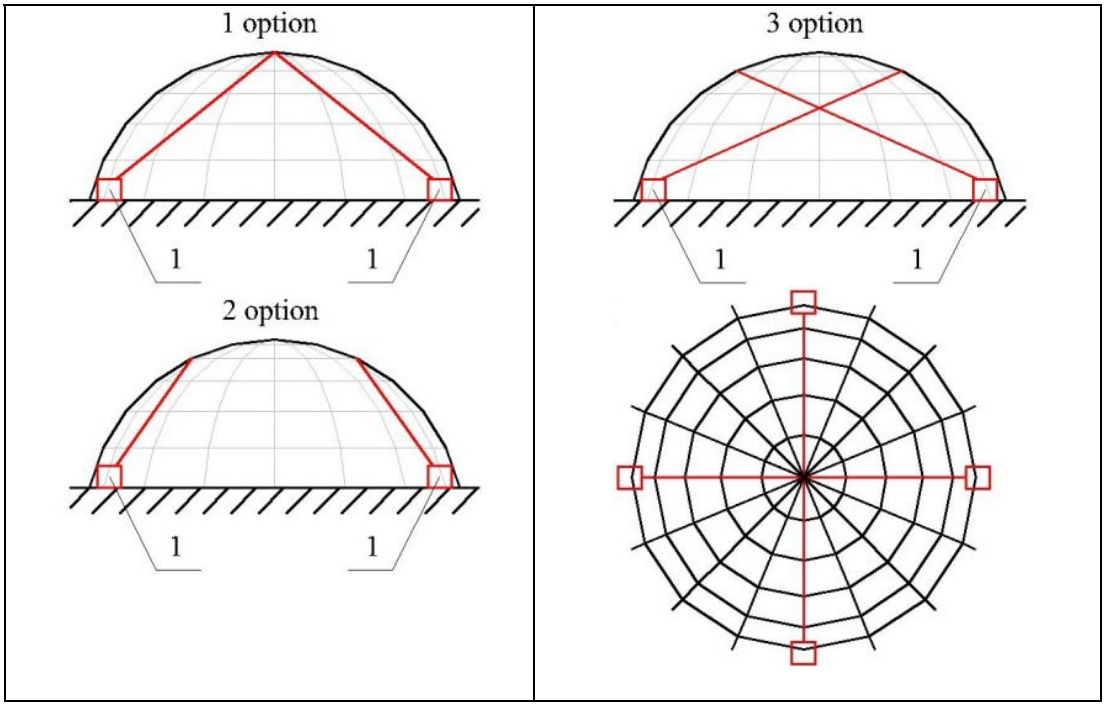


Рис. 2. Варианты установки ленточного гасителя колебаний
(1 – инерционные катушки с преднатяжителями)

На следующем отрезке времени при первом варианте гасителя колебаний (максимальное перемещение достигает 164 мм за 2,4 с) амплитуда плавно уменьшается до 36 мм; при втором (трапециевидном) варианте установки гасителя (здесь максимальное значение перемещения 109 мм) наблюдается более резкое уменьшение амплитуды колебаний по сравнению с остальными вариантами; при третьем, перекрестном, варианте установки (максимальная амплитуда 127 мм за 2,9 с) размах колебаний плавно уменьшается до 8 мм. Наиболее рациональными вариантами установки гасителя выглядят второй и третий, поскольку уменьшение амплитуд узлов купола достигает 38 %.

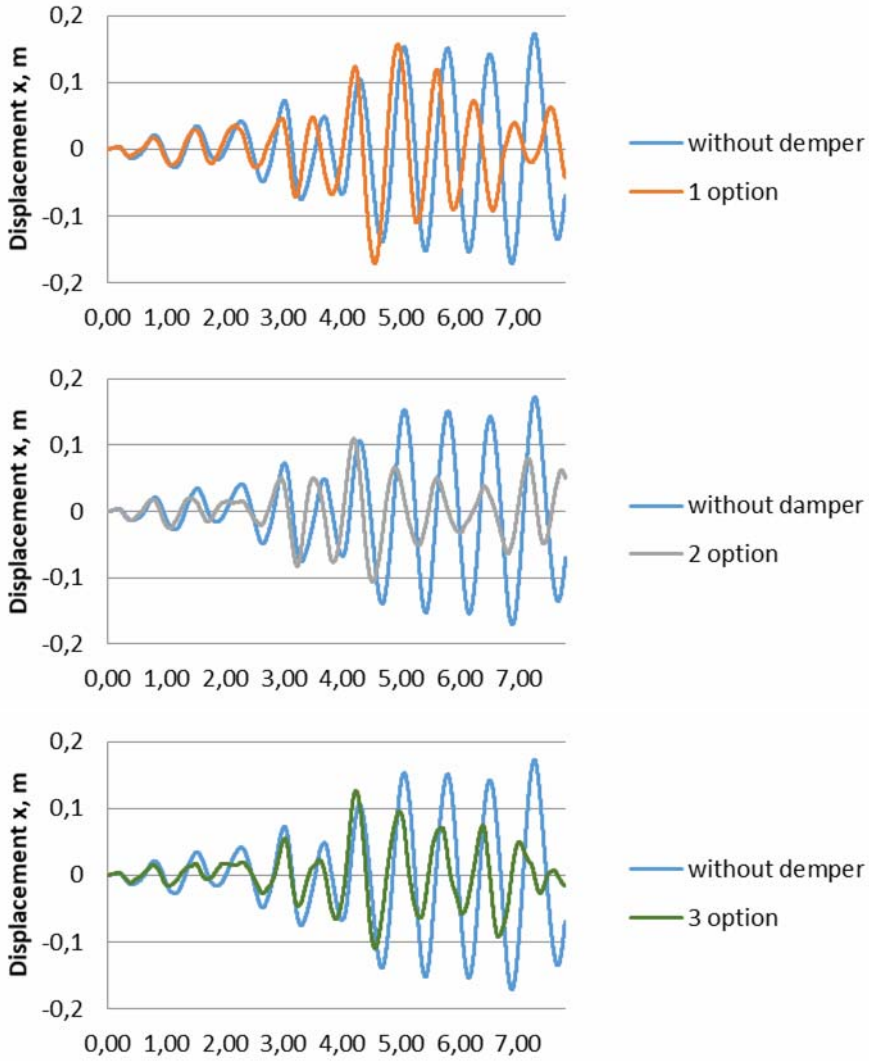


Рис. 3. Графики перемещений полюса купола по оси *x*
с различными вариантами установки гасителя

II. Применение пластических накладок является необходимым дополнением для рассматриваемых ленточных гасителей, так как при импульсивных внешних воздействиях и импульсах от ленточного гасителя возбуждаются многочисленные высокочастотные формы колебаний. Пластические накладки, являющиеся частотно-широкополосными устройствами, наиболее эффективны в данном случае.

Второй способ основан на работе композитного стержня (стальной сердечник с пластическими накладками). При этом практическая борьба с развитием колебаний осуществляется с помощью алюминиевых полосовых накладок – устройств гашения колебаний пассивного типа: генераторов моментов сопротивления движению для гашения и низкочастотных и высокочастотных колебаний. Т.е. данная система гашения работает на всем спектре колебаний. Высокая эффективность разработанных устройств подтверждается данными экспериментальных исследований.

Важную роль в создании данной композитной системы играет клеевое соединение. Здесь предпочтение отдано полиуретановым клеевым составам. Полиуретановый клей в конструкции соединения является очень гибкой и существенно деформативной прослойкой при работе на растяжение-сжатие, т.е. хорошо выдерживает знакопеременные нагрузки. Эпоксидная смола жесткая, что делает ее более восприимчивой к образованию трещин при изгибе колонн. Еще одним большим преимуществом полиуретана является его короткое время отверждения, или время, необходимое для полного схватывания и отверждения, даже при нанесении нескольких слоев клея.

Динамическая задача вынужденных колебаний механической системы имеет вид дифференциального матричного уравнения движения

$$M\ddot{U} + KU = P \mp F\ ; \tag{1}$$

здесь F – вектор сил пластического торможения, который имеет вид

$$F = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm M_{pl} \\ . \\ . \\ \ldots \\ 0 \\ 0 \\ \pm M_{pl} \end{pmatrix}; \tag{2}$$

$$M_{pl} = 2\sigma_T \cdot b_H \cdot t_H \cdot \frac{h + t_H}{2}, \tag{3}$$

где σ_T – предел текучести материала накладок, для алюминия равный 70 МПа; b_H, t_H – ширина и толщина накладок соответственно; h – высота сечения упругого ядра; M – диагональная матрица масс механической системы.

Для оценки демпфирующего эффекта были проведены численные эксперименты: П-образную раму 3×6 м, выполненную из стальных двутавров №30 с пластическими накладками, подвергли статическому нагружению горизонтальной узловой силой P=50000 Н в верхний узел конструкции, т.е. смоделировали перемещения в раме, соответствующие нагрузке P, а затем внезапно сняли эту нагрузку, вызвав свободные колебания рамы. По итогам численных экспериментов построены графики движения узлов рамы, представленные на рис. 4. Интенсивность гашения зависит от толщины накладок, однако максимальный эффект обеспечивается накладками толщиной 3-4 мм.

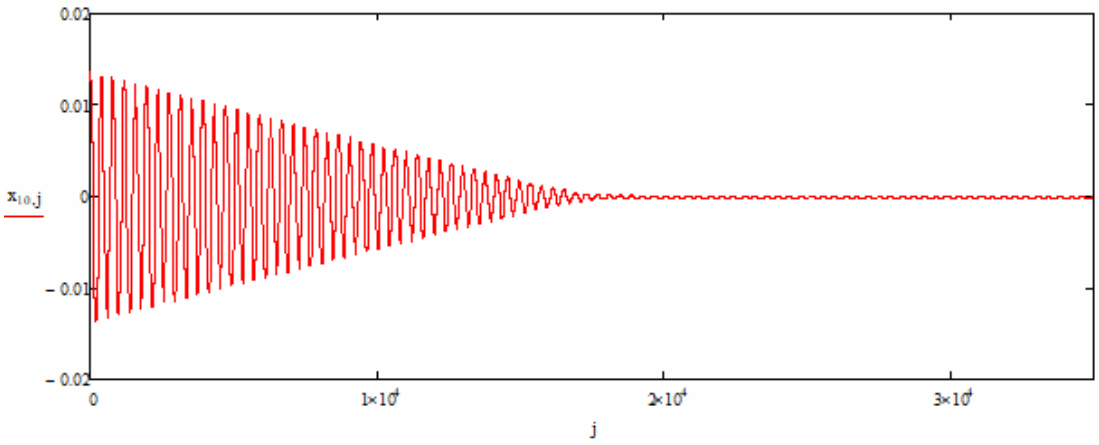


Рис. 4. График перемещений левого верхнего узла рамы при толщине накладок 1 мм

Эффективность демпфирующего эффекта пластических накладок подтверждена результатами физического эксперимента (рис. 5).

Рис. 5. Колебания с накладками (наклеено 75 мкм с каждой стороны на правую (при снятии отсчетов – дальнюю) от наблюдателя стальную полосу)
Амплитуда колебаний балки с накладками достаточно резко уменьшается

III. Реактивная природа силы сопротивления движению позволяет минимальными средствами достигать высокой эффективности. В связи с этим была поставлена цель: исследовать управление динамикой колебательных движений высотных зданий с помощью реактивных систем с газовой струей высокого давления в условиях нестационарных (сейсмических) воздействий. Рассматривалось влияние основных управляемых параметров гасителя на эффективность снижения уровня колебаний зданий. Это такие параметры, как время срабатывания реактивного заряда; количество одновременно срабатывающих зарядов; величина ограничения на перемещение; место установки реактивного гасителя на здании; величина реактивной силы одного заряда. Разработан и описан алгоритм работы реактивного гасителя как генератора знакопеременных импульсов.

Исследовался процесс работы реактивного гасителя колебаний конструкции охладительной башни (градирни) [9] при сейсмическом воздействии. Форма сооружения представляла собой усеченную правильную пирамиду квадратного сечения, с размерами основания 9×9 м и верхнего яруса 6.5×6.5 м. Высота сооружения – 21 м. Конструктивная схема башни – стальной каркас, состоящий из четырех угловых стоек сечением из квадратной трубы □120×120×3 мм.

Сейсмическое воздействие моделировалось на основе записей кинематических характеристик землетрясения, произошедшего в Турции в 1999 г. и характеризующегося высоким уровнем переносных ускорений. Сейсмограмма этого воздействия представлена на рис. 6.

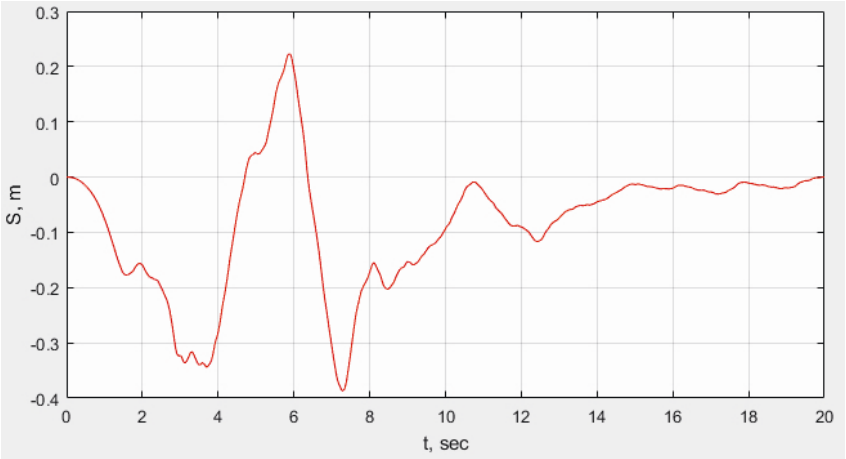


Рис. 6. Сейсмограмма землетрясения

Основным управляющим воздействием была реактивная сила газовой струи, вырывающейся из сопла гасителя под высоким давлением. Реактивная сила от сгорающего топлива определяется известным соотношением:

$$R = V_e \cdot \frac{dm}{dt}. \quad (4)$$

Здесь V_e – скорость выбрасывания газовой струи; $\dot{m}$ – скорость расходования массы топлива.

Варьировались параметры: скорость струи, скорость расходования массы топлива, максимально возможное отклонение башни, время разового действия гасителя. Результаты гашения показаны на рис. 7.

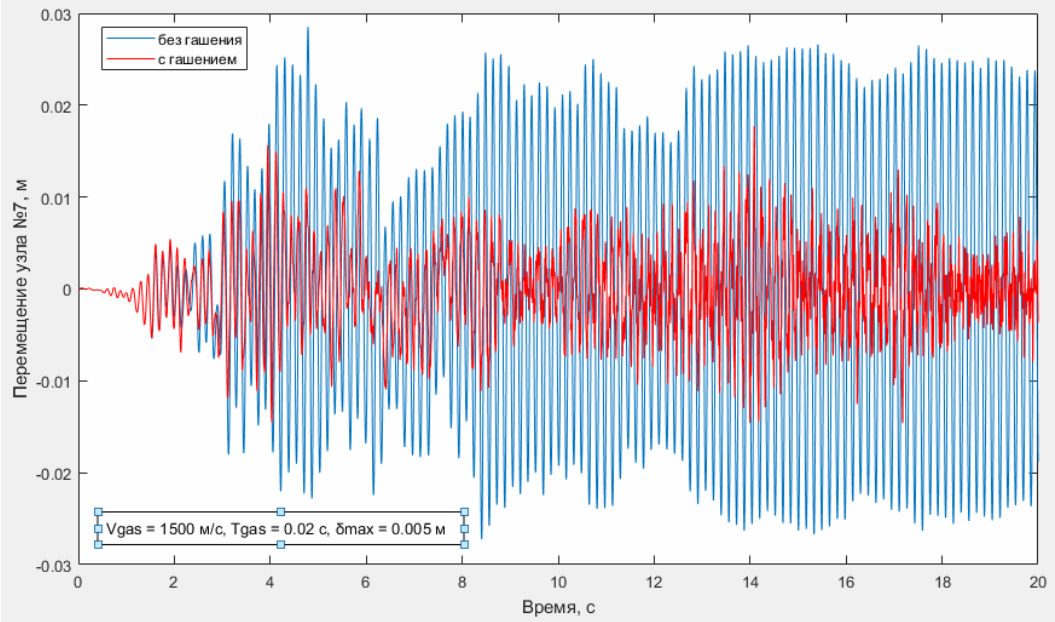


Рис. 7. График гашения колебаний стальной башни-градирни

Таким образом, результатами численного эксперимента показано, что реактивный гаситель с рационально подобранными параметрами управления позволяет снижать уровень механических колебаний зданий и сооружений на 50-80 %.

Вывод. В работе приведены три новых способа гашения колебаний механических систем. Полученные результаты могут служить базой для решения широкого круга задач гашения колебаний и повышения долговечности защищаемых конструкций

Список литературы

1. Динамический расчет зданий и сооружений / под ред. Б.Г. Коренева. − М.: Стройиздат, 1984. − 303 с.

2. Дукарт, А.В. Задачи теории ударных гасителей колебаний / А.В. Дукарт. − М.: Издательство АСВ, 2006−208 с.

3. Булгаков, С.Н. Теория здания. Том. 1. Здание-оболочка / С.Н. Булгаков, А.И. Цейтлин [и др.]. − М.: Издательство АСВ, 2007. − 280 с.

4. Shein, A. New vibration dampers for buildings and structures / A. Shein, A. Chumanov, A. Malkov, N. Laskov // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2503. – P. 050065. – DOI:10.1063/5.0100292.

5. Shein, A.I. Belt vibration damping system for closed-type domes / A.I. Shein, A.V. Chumanov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol.160. – P. 245–252. – DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_33.

6. Шеин, А.И. Определение параметров ленточно-тросового гасителя с торсионом или гидроцилиндром одностороннего действия / А.И. Шеин, А.В. Чуманов, О.Г. Земцова // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2(55). – С. 63–68.

7. Шмелев, А.В. Расчетно-экспериментальное определение параметров модели упрочнения материалов Купера-Саймондса для металлических балок / А.В. Шмелев, А.В. Омелюсик, В.И. Ивченко, С.В. Хитриков // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – №5. – С. 1–19.

8. Шеин, А.И. Гашение колебаний высотных сооружений. Часть 1. Современное состояние проблемы / А.И. Шеин, С.В. Бакушев, М.Б. Зайцев, О.Г. Земцова. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2011. – 234 с.

9. Shein, A.I. Damping of seismic vibrations of towers using a controlled reactive dampener / A.I. Shein, M.B. Zaitsev, A.G. Tamrazyan and T.A. Matseevich // Journal of Structural Engineering. – August – September 2023. – Vol. 50, No. 3. – P. 177–183.

References

1. Dynamic calculation of buildings and structures / ed. by B.G. Korenev. − M.: Stroyizdat, 1984. − 303 p.

2. Dukart, A.V. Problems of the theory of shock dampers of vibrations / A.V. Dukart. − M.: Publishing House DIA, 2006. – 208 p.

3. Bulgakov, S.N. Theory of the building. Vol. 1. The shell building / S.N. Bulgakov, A.I. Zeitlin [etc.]. −M.: Publishing House DIA, 2007. – 280 p.

4. Shein, A. New vibration dampers for buildings and structures / A. Shein, A. Chumanov, A. Malkov, N. Laskov // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2503. – P. 050065. – DOI:10.1063/5.0100292.

5. Shein, A.I. Belt vibration damping system for closed-type domes / A.I. Shein, A.V. Chumanov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol.160. – P. 245–252. – DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_33.

6. Shein, A.I. Determination of the parameters of a ribbon-cable extinguisher with a torsion bar or a single-acting hydraulic cylinder / A.I. Shein, A.V. Chumanov, O.G. Zemtsova // Regional Architecture and Engineering. – 2023. – No. 2(55). – P. 63–68.

7. Shmelev, A.V. Computational and experimental determination of parameters of the Cooper-Simonds material hardening model for metal beams / A.V. Shmelev, A.V. Omelusik,

V.I. Ivchenko, S.V. Khitrikov // Engineering Journal: Science and Innovation. – 2021. – No.5. – P. 1–19.

8. Shein, A.I. Damping of vibrations of high-rise structures. Part 1. The current state of the problem / A.I. Shein, S.V. Bakushev, M.B. Zaitsev, O.G. Zemtsova. – Penza: Publishing house of PGUAS, 2011. – 234 p.

9. Shein, A.I. Damping of seismic vibrations of towers using a controlled reactive dampener / A.I. Shein, M.B. Zaitsev, A.G. Tamrazyan and T.A. Matseevich // Journal of Structural Engineering. – August – September 2023. – Vol. 50, No. 3. – P. 177–183.

УДК 624.012.45 DOI 10.54734/20722958_2024_3_90

Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет)
Россия, 454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76
Ивашенко Юлий Алексеевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Архитектура»
E-mail: ivashenkoia@susu.ru
Шабиев Салават Галиевич,
доктор архитектуры, профессор,
зав. кафедрой «Архитектура»
E-mail: shabievsg@susu.ru

South Ural State University (National Research University)
Russia, 454080, Chelyabinsk, 76, ave. Lenin Street
Ivashenko Yuliy Alekseevich,
Doctor of Sciences,
Professor of the Department «Architecture»
E-mail: ivashenkoia@susu.ru
Shabiev Salavat Galievich,
Doctor of Architecture, Professor,
Head of the Department «Architecture»
E-mail: shabievsg@susu.ru

ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Ю.А. Ивашенко, С.Г. Шабиев

Выполнена систематизация направлений развития строительных конструкций, обеспечивающих снижение их массы и повышение экономических показателей. Приведены результаты экспериментальных исследований по направлению «Комбинированные конструкции» применительно к каркасно-панельным многоэтажным железобетонным системам (плиты, изгибаемые в двух направлениях; контактные стыки колонн).

Для многоэтажных зданий предложены и численно исследованы комбинированные конструкции каркасно-панельной системы с частичным предварительным напряжением перекрытий и колонны с применением трубобетона. Для одноэтажных зданий предложена система автоуправления напряженно-деформированным состоянием.

Ключевые слова: каркасно-панельная система, комбинированные конструкции, трубобетон, управляемые конструкции, управление сопротивлением конструктивных систем и их элементами

INNOVATIVE WAYS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF MULTI-STOREY BUILDINGS MADE OF REINFORCED CONCRETE

Yu.A. Ivashenko, S.G. Shabiev

A systematization of directions for the building structures development is provided, ensuring a reduction of their mass and an increase of economic indicators. The results of experimental studies in the direction of “Combined structures” are presented in relation to frame-panel multi-story reinforced concrete systems: slabs bent in two directions; contact joints of columns.

For multi-storey buildings, combined structures of a frame-panel system with partial prestressing of floors and columns using pipe-concrete have been proposed and numerically studied. For one-story buildings, a system for auto-control of stress-strain state is proposed.

Keywords: frame-panel system, combined structures, pipe-concrete, controlled structures, control of the resistance of structural systems and their elements

Эффективность конструкций и их систем оценивается рядом известных параметров (физико-механические и экономические свойства и технологическая целесообразность, включая социальную потребность).

Снижение массы конструкции при сохранении требуемых физико-механических характеристик является общим направлением для конструктивных систем из разных материалов. Это обеспечивает повышение экономических показателей и конкурентоспособности.

Систематизированы направления, обеспечивающие снижение массы строительных конструкций. Выявлено, что используемые для железобетонных конструкций порошково-активизированные добавки приводят к увеличению прочности бетона в 1,62-2,55 раза [1]. Создание бетонов с содержанием полимеров повышает их характеристики [2]. Применение металла и углеродных волокон для производства дисперсно-армированных бетонов увеличивает прочность на растяжение до 0,3-0,4 % [3, 4]. В области разработки металлических конструкций используются алюминиевые сплавы и облегчённые профили [1, 5].

Основная тенденция в развитии конструктивных систем с повышенной степенью статической неопределимости – это комбинирование материалов и технологий [6].

В конструктивных системах с повышенной степенью статической неопределимости выявлены тонкостенные пространственные и кессонные конструкции, управляемые конструктивные системы, а также оценены структурообразования несущих конструкций на основе анализа биологических систем [7-11]. Рассматриваются конструктивные системы, обладающие признаками живой природы, – энергетическая проводимость, перераспределение, преобразование, зарядка, защита от вредных внешних воздействий [8, 9].

В направлении технологий изготовления материалов выявлены искусственные материалы, такие, как фибробетон, порошково-активизированный бетон, самоуплотняющийся бетон [1, 3, 4]. В организационных приемах, направленных на снижение затрат, предполагаются бизнес-модели интеграции стадий проектирования и строительства [12]. Уточнение данных о свойствах материалов дает возможность усовершенствовать методы определения напряженно-деформированного состояния элементов, а также определить критерии разрушения материалов [1, 11, 13-15]. Разработаны новые теории описания нелинейных свойств материалов и характеристик конструкций. Экспериментальные статистические показатели выявили изменчивость свойств и характеристик материалов и конструкций, а также теории их надежности с учетом прогрессирующего разрушения.

В связи с требованиями экологии определены новые подходы к оценке конструктивных систем как средство архитектурно-эстетического выражения эволюционного развития регионального зодчества.

В настоящее время приоритетными являются сборные и сборно-монолитные технологии железобетонных конструкций, а в области металлических конструкций – тонкостенные профили из легированной стали. Этот технологический приём направлен на создание управляемых конструкций и систем.

В области железобетонных конструкций многоэтажных жилых и общественных зданий увеличилось применение монолитного железобетона, а в области одноэтажных зданий – металлических стержневых конструкций [9]. При возведении многоэтажных каркасно-панельных систем расход бетона и металла составлял соответственно 0,065 м³ и 12 кг на 1 м³ объема здания. На текущий момент при монолитной технологии возведения расход бетона – 0,085 м³/м³ и 90-120 кг/м³. При этом расход металла достигает в некоторых случаях до 150 кг/м³ (по данным анализа проектов в г. Челябинске).

Повышенный расход металла объясняется двумя факторами:

– технологическим, обусловленным необходимостью обеспечивать положение верхней арматуры за счёт специальных каркасов, не участвующих в восприятии внутренних усилий, конструктивно нерабочая арматура;

– использованием программ в линейной постановке, без учёта образования трещин и неупругих деформаций, а также расчётных схем, не учитывающих влияния распорных усилий в перекрытиях.

Основной тенденцией развития железобетонных конструкций является разработка облегчённых перекрытый за счёт уменьшения расхода тяжёлого бетона классов В20-

В30 [6]. Сущность этих разработок состоит в том, что при изгибе и внецентренном сжатии в сплошных монолитных плитах наблюдаются зоны, в которых напряжения существенно меньше предельных. Заполнение этих зон лёгким бетоном или создание пустот в этих зонах уменьшает массу конструкции без снижения прочности и надёжности.

При этом возникают дополнительные положительные характеристики:

– сокращение расхода металла во всех элементах каркаса;

– обеспечение сейсмостойкости за счёт снижения инерционных усилий;

– повышение звуко- и теплоизоляции перекрытий;

– снижение трудоёмкости и потребления энергии.

Многоэтажные здания с использованием монолитных железобетонных конструкций остаются достаточно распространённым видом несущей системы, одновременно со сборной панельной.

При изучении комбинированной конструкции плитных элементов не удалось обнаружить результатов экспериментальных исследований при следующей комбинации материалов: тяжелый монолитный бетон, бетонные блоки из ячеистого или арболитобетона, металлическая и пластиковая арматура. В зарубежных странах комбинированные конструкции производятся по технологиям Airbeek, Bubble_Deck, Cobiax, Монофант. Ниже представлены экспериментальные данные, необходимые для практики проектирования конструктивных систем с позиции обеспечения их надежности.

1. Экспериментальные исследования плитных элементов, изгибаемых в двух направлениях комбинированной конструкции.

Арболитовые блоки имели размеры 200×400×100 мм. В каждом образце размещалось 20 блоков, которые создавали перекрёстные рёбра: по контуру – 170×100 мм, в средней зоне – 80×100 мм (табл. 1). Приведены характеристики опытных образцов №0-7 в виде плит с шарнирными опорами по углам: в образце №0 – металлическая арматура; в образцах №1-7 – комбинированная. Нагружение образцов ступенчатой нагрузкой осуществлялось поэтапно, распределённой – равномерно (табл. 2). При испытании величины этапной нагрузки и общей нагрузки определялись суммированием взвешенных заранее чугунных грузов, перемещения измерялись индикаторами часового типа, деформации – рычажными тензометрами.

Таблица 1

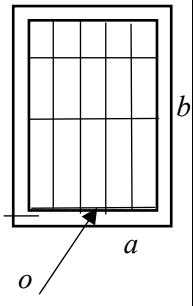
№	Показатели, характеристики		Образцы							
			0	1	2	3	4	5	6	7
1	Прочность бетона, МПа		25,0	24,8	24,6	24,6	29,3	12,4	13,1	13,1
2	Арматура	см²(k)Asa	1,58	2,62	2,62	2,62	1,58	1,58	0,57	0,57
		Asb (k)	1,58	1,58	1,58	1,58	2,62	2,62	1,58	1,58
		Asa(o)	1,58	0,86	0,51	0,51	0,85	0,85	0,38	0,38
		Asb (o)	1,58	2,01	2,01	2,01	3,16	3,16	2,01	2,01

Таблица 2

Номер образца	P_{uet}, КПа	P_{crc}, КПа		f_{crc}, мм		$a_{uet\,crc}$, мм		f_{uet}, мм		
		a	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*c*
0	27,45	-	-	-	-	-	-	7,0	8,5	13,3
1	51,84	30,2	14,1	6,05	5,7	0,6	3,1	10,2	30,9	41,6
2	46,47	9,9	9,9	0,53	0,81	0,2	2,1	-4,1	69,6	77,1
3	47,81	18,6	11,3	0,45	1,15	0,2	3,2	-4,4	71,8	82,3
4	59,33	19,7	19,7	1,46	4,55	2,1	1,8	33,8	26,1	71,5
5	54,16	19,6	14,6	1,82	3,45	2,2	1,2	42,6	20,9	73,6
6	39,54	18,5	14,8	1,23	4,91	3,0	1,5	26,1	34,5	66,2
7	34,50	18,4	18,5	2,25	6,95	3,1	1,6	24,8	21,3	47,4

Примечание: P_{uet} – разрушающая нагрузка; P_{crc} – нагрузка по трещинам; f_{ccc} – прогиб по трещинам; $a_{uet\ crc}$ – ширина трещин; f_{uet} – прогиб, соответствующий предельной разрушающей нагрузке.

2. Экспериментальные исследования бессварного контактного стыка колонн каркасно-монолитной системы.

Бессварный контактный стык (БКС) колонн имеет следующие особенности, снижающие трудоемкость изготовления и монтажа сборных колонн:

- передача усилий через сжатую арматуру по принципу «стык внахлёст»: вар. 1 – арматура верхней колонны размещается в каналах нижней, заполняемых полимерцементным раствором (ПР); вар. 2 – выпуски арматуры верхней колонны располагаются в каналах нижней колонны, заполняемых ПР;
- передача усилий через бетонное сечение колонны осуществляется по контактному шву из полимерцементного раствора.

В БКС усилие в арматуре передается по схеме «продавливания».

2.1. Испытание на сцепление бетона с арматурой при ее продавливании.

Цель – определение влияния длины контакта сжатой арматуры на предельную нагрузку. Нагрузка измерялась по шкале испытательной машины, смещение концов – индикаторами часового типа (рис. 1, 2). Образцы-призмы, сечением 200×200 мм с центральным отверстием Ф=40 мм, со стержнями Ф=20, 25, 32 мм, длиной соответственно – 440, 550, 705 мм (табл. 3).

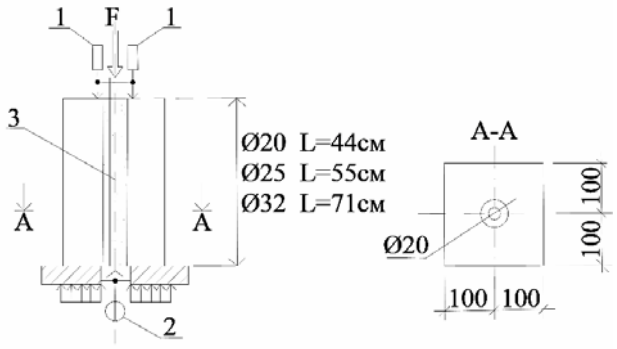


Рис. 1. Образцы для исследования сцепления при вдавливании арматуры в растворе в канале

Рис. 2. Испытания на продавливание арматуры относительно бетона

Таблица 3

№	*L*, мм	Проч. бет., кгс/см²	Проч. р-ра, кгс/см²	Ф, мм	Пред. усил. F_{ult}, тс	$\frac{F_{ult}}{F_s}$	F_0, тс	Напряж. $\tau_{сц(ср)}$, кгс/см²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	440	117	М300	20	10,99	0,59	7,2	79,6
2	-	173	М300	20	8,33	0,72	5,0	60,4
3	-	148	М300	20	22,31	0,21	11,6	161,0

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	550	173	М300	25	11,6	0,77	5,5	53,7
5	-	173	М300	25	10,8	0,80	4,1	50,1
6	-	173	М300	25	8,1	0,86	5,2	37,7
7	705	148	М300	32	28,2	0,69	18,3	79,7
8	-	148	М300	32	24,0	0,70	6,5	67,8
9	-	148	М300	32	23,8	0,72	20,0	67,2
10	440	117	М600	20	25,1	0,81	8,5	181,9
11	-	117	М600	20	31,0	0,84	7,0	224,6
12	-	117	М600	20	20,0	0,85	10,0	144,9

Примечание: F_{uet} / F_s – отношение предельного усилия к усилию для достижения расчётного сопротивления (R_s = 3550 кгс/см²); Ф – диаметр арматуры класса А400; F_0 – усилие по изменению скорости увеличения сдвига арматуры относительно бетона; $\tau_{сц\,(ср)}$ – среднее напряжение сцепления.

Основные выводы:

- при одинаковой длине заделки арматуры сцепление обеспечивается раствором, прочность которого влияет на прочность сцепления при продавливании арматуры с бетоном;
- F_{uet} / F_s <1, поэтому в стыках необходимо принять дополнительные конструктивные меры для повышения прочности (поперечное армирование).

2.2. Испытание контактного стыка колонн.

Цель испытания – определение прочности и податливости стыка колонн. Испытано пять образцов со стыком в каналах Ф=40 мм с арматурой Ф=20 мм класса А400 длиной канала 440 мм. Нагрузка прикладывалась с эксцентриситетами от 2.0 до 8 и 12 см. Бетон колонны – В20, а марка раствора, дополняющего каналы, – М600 (рис. 3).

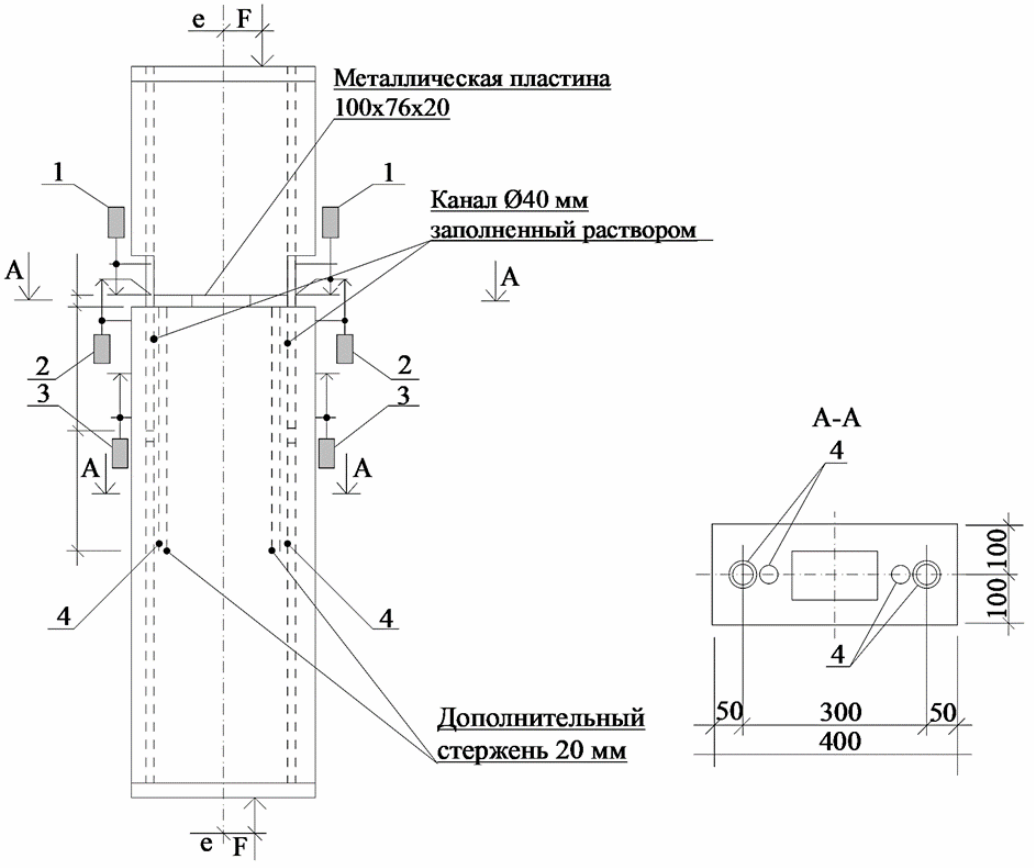


Рис. 3. Образцы для исследования стыка колонн на сжатие

С помощью установленных приборов определялось податливость в сравнении с сечением колонн за пределами стыка (табл. 4). Деформации измерялись индикаторами часового типа, а нагрузка – по шкале испытательной машины. Нагрузка прикладывалась этапами по 10 тс с выдержками в 15 мин. Податливость оценивалась по углам поворота поперечных сечений образца колонны по деформации правой и левой сторон образца (табл. 5, 6).

Таблица 4

№	Параметры		Разрушающее усилие F_{ult}, тс	Углы поворота		Напряжение	
	Эксцентриситет e_0, см	Арматура Ø, мм		По шву	По целому сечению	В наиболее удаленной от F, кгс/см²	В менее удаленной от F, кгс/см²
1	12	20	100	$0{,}523\cdot10^{-3}$	$0{,}071\cdot10^{-3}$	5080	>6000
2	12	20	110	$0{,}226\cdot10^{-3}$	$0{,}017\cdot10^{-3}$	2720	5070
3	8	20	162	$0{,}228\cdot10^{-3}$	$0{,}064\cdot10^{-3}$	3050	2800
4	8	20	151	Разрушение бетона под закладной на торце колонны, к которой прикладывалась нагрузка			
5	2	20	195	$0.105\cdot10^{-3}$	$0.015\cdot10^{-3}$	2900	5090

Таблица 5

e_0, см	Грани сечения	Продольные деформации		
		Арм. $\Delta s\cdot10^{-3}$, мм	Шов $\Delta ш\cdot10^{-3}$, мм	Бетон $\Delta в\cdot10^{-3}$, мм
12	Сжатие	-10…20	-37…134	-3…14
	Растяжение	+12…50	+58…86	+4…16
8	Сжатие	-12	-54	-5
	Растяжение	+11	+67	+22

Таблица 6

Эксц. e_0, см	Угол поворота	
	По шву φ(ш) $\cdot10^{-3}$	По целому сечению φ(в) $\cdot10^{-3}$
12	0,226…0,523	0,017…0,071
8	0,228	0,064

Основные выводы испытаний:

- при эксцентриситетах 8 и 12 см разрушение имело вид раздавливания бетона в зоне стыка и у грани сечения;
- до величины внешней силы зависимости «Δs – F; Δщ – F; Δв – F» были линейными; перед разрушением нелинейность в зоне сжатия увеличилась в 1,9-14 раз и в зоне растяжения – в 3-15 раз;
- в зоне шва деформация существенно больше, чем за его пределами, это привело к увеличению углов поворота, что определяет податливость стыка.

2.3. Испытание монтажного крепления колонны при применении бессварного контактного стыка колонн.

Монтажное закрепление колонн нужно на период заполнения каналов и швов раствором. Зажим фиксирует арматуру верхней колонны в канале нижней. Испытание проведено путём действия поперечного усилия на расстоянии 650 мм от стыкового шва. При горизонтальном нагружении пропорциональность деформаций и нагрузок сохранялась – 320 кг, изгибающий момент – 0,208 тс.м. На высоте до 10 м для района ветровой нагрузки г. Челябинска при длине колонны 6 м изгибающий момент – 0,069 тс.м<0,208 тс.м.

Основной вывод: монтажное крепление обеспечивает закрепление верхней колонны длиной 6 м на период твердения раствора.

3. Исследования по повышению эффективности комбинированных конструкций каркасно-панельной системы.

Проведено численное исследование с применением метода конечных элементов (МКЭ) проектных разработок.

3.1. Трубобетон для колонн.

Разработана конструкция колонн в виде металлической трубы, заполненной монолитным бетоном. При использовании этой технологии сокращается расход материалов и уменьшается трудоемкость возведения: металл работает на растяжение, а бетон – при объемном напряженном состоянии.

Неисследованным вопросом является конструкция узла соединения сжатого трубобетонного элемента с перекрытием каркасно-панельной системы. Проведено численное исследование с применением МКЭ, которое показало:

- определённая зона бетона монолитного перекрытия с двойным армированием выполняет роль обоймы, что обеспечивает прочность в зоне узла;
- преднапряжение верхней арматуры повышает эффект обоймы;
- полученные результаты дают возможность применения трубобетона для возведения монолитных колонн, пожаростойкость обеспечивается специальными современными покрытиями.

3.2. Частичное предварительное напряжение при возведении монолитного облегченного перекрытия каркасно-панельной системы.

Частичное преднапряжение создается только в верхней арматуре, которая располагается в каналах со специальными анкерными устройствами.

Это исследование показало следующее:

– увеличение трещиностойкости в зоне перекрытия по критерию $t \le R_{bt}$;

– снижение напряжения в рёбрах перекрытия, расположенных по осям;

– уменьшение эксплуатационных прогибов по поверхности перекрытия;

– изменение показателей пропорционально величине преднапряжения;

– преднапряжение является элементом направления, основанного на идее «управления» напряженным состоянием конструктивных систем [14].

Возможность «управления» (регулирования) основывается на работах по областям: 1) создание предварительных напряжений (ПН); 2) увеличение статической неопределимости (СНО); 3) использование неупругих деформаций и специальных конструкций. Сущность управления состоит в том, чтобы изменить напряжённо-деформированное состояние несущей системы в сторону увеличения её сопротивления. При этом «дополнительная» энергия используется для направления (1), а в направлениях (2) и (3) не используется.

Ниже предложена и численно исследована конструктивная система для одноэтажного здания с реализацией «самоуправления» (рис. 4). Самоуправление происходит при действии внешней вертикальной временной нагрузки. За счёт податливости узлов (3) возникают усилия (5).

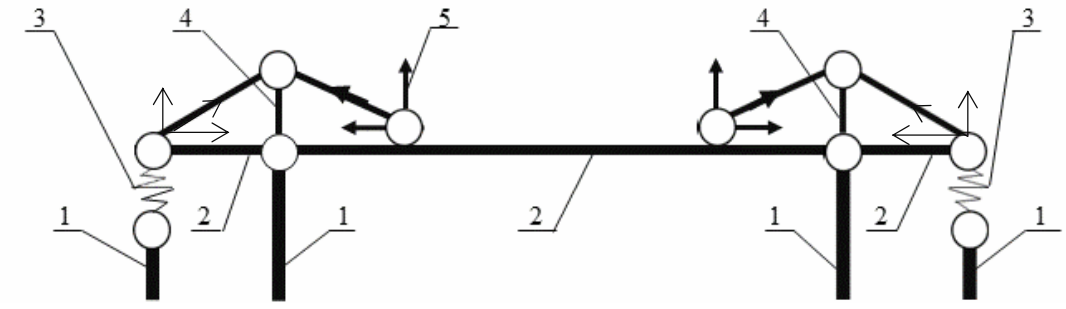


Рис. 4. Самоуправляемая система.
1 – колонны; 2 – ригели; 3 – податливый узел; 4 – система регулирования;
5 – усилия от временной нагрузки

Вертикальное усилие разгружает ригель среднего пролёта, частично изменяя начальную расчётную схему. Горизонтальное усилие создаёт сжатие на участках опоры среднего и крайних ригелей. Путём изменения податливости узла (3) можно регулировать распределение усилий без внешней энергии. Система наиболее эффективна для конструктивной системы, в которой внешняя временная нагрузка существенно меньше, чем её собственный вес.

Полученные результаты показали общую тенденцию к снижению массы систем. У монолитных железобетонных конструкций имеется преимущество: повышение статической неопределимости, независимость застройщиков от технических и производственных возможностей сборных элементов. «Управляемые конструкции» являются направлением, которое обеспечивает увеличение эффективности конструктивных систем при возведении одно- и многоэтажных зданий. Это направление следует считать шагом в эволюции формообразования в условиях требований современной архитектуры.

Список литературы

1. Булгаков, А.А. Прочность на растяжение при изгибе бетонов нового поколения / А.А. Булгаков, И.В. Ерофеева, А.А. Ишутин, В. В. Афонин, В. В. Моисеев // Эксперт: теория и практика. – 2022. – №2 (17). – С. 23–27.

2. Овчинников, И.И. Моделирование ползучести и накопления повреждений в армополимербетонных конструкциях с учетом влияния агрессивной среды / И.И. Овчинников, В.Н. Мигунов // Строительные материалы. – 2012. – №12. – С. 7–10.

3. Ерофеев, В.Т. Обзор патентов по изготовлению изделий под давлением из высокопрочного фибробетона / В.Т. Ерофеев, Д.А. Кретов // Эксперт: теория и практика. – 2022. – №2 (17). – 32. с.

4. Абсиметов, В.Э. Пространственные тонкостенные конструкции на основе стеклофибробетона / В.Э. Абсиметов, Л.А. Панченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – №1. – С. 28–29.

5. Кузнецов, Д.Н. Исследование расчётной схемы пространственной решётчатой конструкции на примере пожарной вышки высотой *h*=45 м / Д.Н. Кузнецов, В.Г. Сазыкин, В.А. Шпакова // Современное строительство и архитектура. – Екатеринбург, 2017. – № 3 (07). – С. 9–15.

6. Ивашенко, Ю.А. Результаты экспериментальных исследований облегчённомонолитных плит перекрытий скомбинированным армированием / Ю.А. Ивашенко, А.Х. Шарифов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. – Челябинск, 2020. – Т. 2, №3. – С. 14–21.

7. Ивашенко, Ю.А. Экспериментальные исследования прочности, жёсткости и трещиностойкости облегчённых плит с комбинированным армированием / Ю.А. Ивашенко, А.Х. Шарифов, А.Д. Рахмонхода // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. – Челябинск, 2021. – Т. 21, №4. – С. 5-15.

8. Мищенко, А.В. Динамический расчет композитных стержневых систем при кинематических воздействиях / А.В. Мищенко // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. – Челябинск, 2015. – Т. 15, №3. – С. 5-10.

9. Иевлева, О.Т. Обзор эволюции фасадов зданий и сооружений / О.Т. Иевлева, И.И. Чикаев // Инженерный вестник Дона. – 2022. – №4. – 18 с.

10. Вилисова, А.Д. Совершенствование управления в системе взаимодействия участников инвестиционно-строительных проектов на базе облачных технологий // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. – Челябинск, 2022. – Т. 22, №4. – С. 46–56.

11. Балдин, И.В. Экспериментальные исследования стыков сборных железобетонных колонн каркаса конструктивной системы «КУПАСС» на действие статических нагрузок / И.В. Балдин, М.Е. Гончаров, С.В. Балдин, О.Ю. Тигай // Вестник ТГАСУ. – 2015. – №5. – С. 64–71.

12. Трещев, А.А. О вариантах выбора диаграмм деформирования композитных материалов и не только / А.А. Трещев, И.А. Захарова, И.А. Чудакова // Эксперт: теория и практика. – 2022. – №2 (17) – С. 81–90.

13. Ivashenko, Y.A. Experimental studies on the impact of strain and loading modes on the formation of concrete «stress-strain» relations. / Y.A. Ivashenko, A.A. Ferder // Construction and Buildings Materials. – 2019. – P. 234–239.

14. Джанкулаев, А.Я. Расчет несущей способности изгибаемых плит с учетом диаграмм деформирования бетона / А.Я. Джанкулаев, О.М. Шогенов, З.Р. Лихов, А.М. Казиев, И.П. Блянихов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – №50(1). – С. 161–166.

15. Ivashenko, Y.A. A numerical study of the performance of a combined floor panel / Yu.A. Ivashenko, S.A. Sonin // Bulletin of SUSU. Series «construction and architecture». – Chelyabinsk, 2022. – Vol. 22, no. 4. – P. 5–14.

References

1. Bulgakov, A.A. Tensile strength in bending of new generation concrete / A.A. Bulgakov, I.V. Erofeeva, A.A. Ishutin, V.V. Afonin, V.V. Moiseev // Expert: theory and practice. – 2022. – No. 2 (17). – P. 23–27.

2. Ovchinnikov, I.I. Modeling of creep and damage accumulation in reinforced polymer concrete structures taking into account the influence of an aggressive environment / I.I. Ovchinnikov, V.N. Migunov // Construction materials. – 2012. – No. 12. – P. 7–10.

3. Erofeev, V.T. Review of patents for the manufacture of products under pressure from high-strength fiber concrete / V.T. Erofeev, D.A. Kretov // Expert: theory and practice Tolyatti: ANO ISSTE. – 2022. – No. 2 (17). – 32. p.

4. Absimetov, V.E. Spatial thin-walled structures based on glass fiber reinforced concrete / V.E. Absimetov, L.A. Panchenko // Belgorod State Technological University named after. V. G. Shukhova. – 2009. – No. 1. – P. 28–29.

5. Kuznetsov, D.N. Study of the design diagram of a spatial lattice structure using the example of a fire tower with a height of h=45m / D.N. Kuznetsov, V.G. Sazykin, V.A. Shpakova // Modern construction and architecture. – Ekaterenburg, 2017. – No. 3 (07). – P. 9–15.

6. Ivashenko, Yu.A. Results of experimental studies of lightweight monolithic floor slabs with combined reinforcement / Yu. A. Ivashenko, A. Kh. Sharifov // Bulletin of the South Ural State University. – 2020. – Vol. 2, No. 3. – P. 14–21.

7. Ivashenko, Yu.A. Experimental studies of strength, rigidity and crack resistance of lightweight slabs with combined reinforcement / Yu.A. Ivashenko, A.Kh. Sharifov, A.J. Rakhmonkhoda // Bulletin of SUSU Construction and Architecture. – 2021. – Vol. 21, No. 4. – P. 5–15.

8. Mishchenko, A.V. Dynamic calculation of composite rod systems under kinematic influences / A.V. Mishchenko // Vestnik SUSU. Series: Construction and architecture. – Chelyabinsk, 2015. – Vol. 15 – No. 3 – P. 5–10.

9. Ievleva, O.T. Review of the evolution of facades of buildings and structures / O.T. Ievleva, I.I. Chikaev // Engineering Bulletin of the Don. – 2022. – P. 4.

10. Vilisova, A.D. Improving management in the system of interaction be-tween participants in investment and construction projects based on cloud technologies / A.D. Vilisova // Bulletin of SUSU. Series «construction and architecture». – 2022. – Vol. 22, no. 4. – P. 46–56.

11. Baldin, I.V. Experimental studies of joints of prefabricated reinforced concrete columns of the frame of the KUPASS structural system under the action of static loads / I.V. Baldin, M.E. Goncharov, S.V. Baldin, O. Yu. Tigai // Bulletin of TGASU. – 2015. – No. 5. – P. 64–71.

12. Treshchev, A.A. About options for choosing deformation diagrams of composite materials and not only / A.A. Treshchev, I.A. Zakharova, I.A. Chudakova // Expert: theory and practice. – 2022 – No. 2 (17). – P. 81–90.

13. Ivashenko, Y.A. Experimental studies on the impact of strain and loading modes on the formation of concrete «stress-strain» relations. / Y.A. Ivashenko, A.A. Ferder // Construction and Buildings Materials. – 2019. – P. 234–239.

14. Dzhankulaev, A.Ya. Calculation of the bearing capacity of bendable slabs taking into account concrete deformation diagrams / A.Ya. Dzhankulaev, O.M. Shogenov, Z.R. Likhov, A.M. Kaziev, I.P. Blyanikhov // Calculation of the bearing capacity of bending slabs taking into account concrete deformation diagrams. Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science. – 2023. – No.50(1) – P. 161–166.

15. Ivashenko, Y. A. A numerical study of the performance of a combined floor panel/ Yu. A. Ivashenko, S. A. Sonin // Bulletin of SUSU. Series «construction and architecture». – Chelyabinsk, 2022. – Vol. 22, no. 4. – P. 5–14.

УДК 624.012.45:692.2:624.04 DOI 10.54734/20722958_2024_3_100

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, зав. кафедрой «Строительные конструкции»

Раззак Алаа Ваххаб Раззак,
магистр
E-mail: alaarazzaq6@gmail.com

Зернов Владимир Викторович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика»
E-mail: wolodia.zernow@yandexs.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Россия, 420043, Республика Татарстан,
г. Казань, ул. Зеленая, д.1,
тел./факс: (8843) 510-46-01

Мирсаяпов Илшат Талгатович,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Железобетонные и каменные конструкции»
E-mail: mirsayapovit@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

Laskov Nikolay Nikolaevich,
Doctor of Sciences, Head of the Department «Building Structures»

Razzak Alaa Vahhab Razzak,
Masters in engineering
E-mail: alaarazzaq6@gmail.com

Sernow Vladimir Viktorowich,
Doctor of Sciences, Associate Professor of the Department «Mehcanika»
E-mail: wolodia.zernow@yandexs.ru

Kazan State University of Architecture and Civil Engineering
Russia, 420043, Republic of Tatarstan,
Kazan, 1, Green St.,
tel./fax: (8843) 510-46-01

Mirsayapov Ilshat Talgatovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the Department «Reinforced Concrete and Stone Structures»
E-mail: mirsayapovit@mail.ru

МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛОТИНАХ

Н.Н. Ласьков, Р.А.В. Раззак, В.В. Зернов, И.Т. Мирсаяпов

Анализируются условия и механизмы образования и развития трещин на поверхности плотины, подверженной наибольшему давлению воды. На основе анализа распределения напряжений в пределах трещинообразования прогнозируются возможное направление развития опасной трещины и смещение бетона, прилегающего к трещине.

Ключевые слова: железобетонные плотины, давление воды, жидкость в трещине, прочность, напряжения, деформации

MECHANISM OF CRACKS FORMATION AND DEVELOPMENT IN REINFORCED CONCRETE DAMS

N.N. Laskov, R.A.V. Razzak, V.V. Sernow, I.T. Mirsayapov

The conditions and mechanisms of cracks formation and development on the surface of a dam exposed to the highest water pressure are analyzed. Based on the analysis of stress distribution within the crack formation, the possible direction of development of a dangerous crack and displacement of concrete adjacent to the crack are predicted.

Keywords: reinforced concrete dams, water pressure, liquid in the crack, strength, stresses, and deformations

Плотины являются одним из важнейших водных объектов (рис. 1), их обрушение приносит серьезные бедствия.

Плотины из бетона выдерживают огромное давление воды, а также перепады температур – от горячих на внешних поверхностях до холодных на внутренних поверхностях под водой. Эти два фактора, давление и температура, являются основными причинами появления трещин в бетоне плотин. Трещины образовываются внутри или

снаружи плотины. Внешние трещины более опасны для бетонных плотин, чем внутренние трещины. Они позволяют воде проникать в бетон и легче распространяются внутри плотины, ослабляя ее по мере распространения трещин. Наличие швов, образованных в результате технологии возведения многослойных бетонных блоков, и швов между стеной и фундаментом плотины играет главную роль в общей картине трещинообразования плотины. Фактически эти швы являются границами раздела и потенциальными местами образования трещин, которые приводят к проникновению воды внутрь трещины и ослаблению конструкции плотины. Внутри трещины возникает дополнительное постоянное давление воды, которое воздействует на трещину. Величина этого давления зависит от смещения отверстия трещины и изменяется по экспоненциальному закону от нуля до максимального значения, равного сумме гидростатического давления и приложенного избыточного давления.

Для обеспечения надежности эксплуатации железобетонных плотин необходимо знать механизмы распространения трещин в бетоне плотины из-за давления воды и факторы, способствующие этому, а также процесс увеличения трещин из-за роста давления воды, поступающей в бетон во время эксплуатации плотины.

Описать процесс образования трещин на поверхности плотины, подверженной наибольшему давлению воды, а также определить возможный путь трещины и величину напряжений, создаваемых в пределах трещины, и величину смещения бетона, прилегающего к трещине, можно на основе изучения механизмов распространения трещин внутри тела плотины. Для предотвращения риска разрушения плотины из-за большого количества трещин разрабатываются решения защиты плотины от трещин, вызванных воздействием внутреннего давления воды.

Рис. 1. Железобетонная плотина (река Заб-Сагир, Сулеймания, Ирак, высота 116 м)

Нелинейное поведение бетона плотины в зоне открывающихся трещин описывает механика разрушения [1, 2]. Это поведение можно описать как три различных режима отказа (рис. 2).

Первый режим – это обычный режим открывания, при котором бетон подвергается растягиванию.

Второй режим является причиной сдвига, третий режим – разрыв бетона.

Первая ситуация – это распространенный тип разрыва, который возникает в чистом виде. Различные режимы отказа могут возникать независимо или в их комбинации. Второй режим может быть запущен как первый режим, т.е. как трещина, подвергнутая растягивающему напряжению.

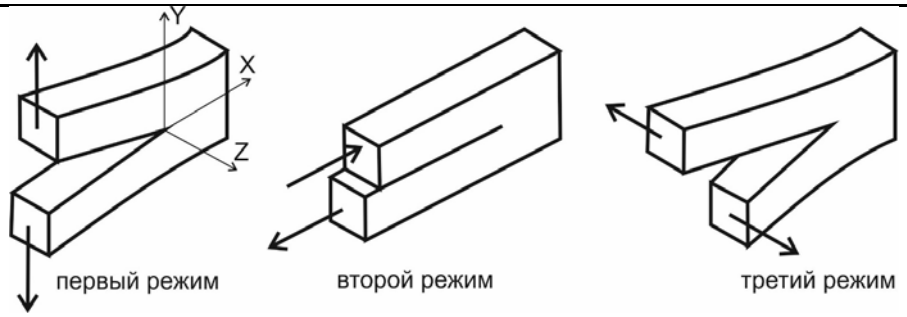


Рис. 2. Различные типы режимов отказа

На рис. 3 показано распределение напряжений вдоль зоны разрушения. В соответствии с положением первого разрушения небольшие трещины последовательно образуются вдоль зоны разрушения a_0, a затем эти небольшие трещины распространяются вдоль рабочей зоны трещины l_p.

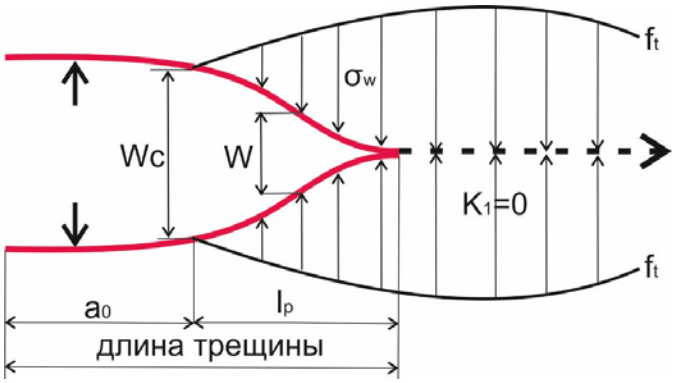


Рис. 3. Иллюстрация распределения напряжений на вершине трещины
в соответствии с первым режимом

На рис. 3 показаны ширина отверстия микротрещины W и общая ширина трещины W_c. Напряжение в переходной зоне между общей трещиной и зоной микротрещины перед процессом разрыва равно нулю. Напряжение в процессе разрушения зоны разрыва увеличивается до максимального значения, равного пределу прочности при растяжении на конце трещины.

Разрушение бетона в зоне разрыва можно оценить, используя механику линейного упругого разрушения. Механика линейного упругого разрушения предполагает, что материал является изотропным и линейным. В этой теории трещины характеризуются интенсивностью напряжений и энергетическим балансом при растрескивании. В механике линейного упругого разрушения к концу трещины прикладывается перпендикулярное давление с линейными упругими свойствами. Общий вид концентрации напряжения на конце трещины приведен на рис. 4.

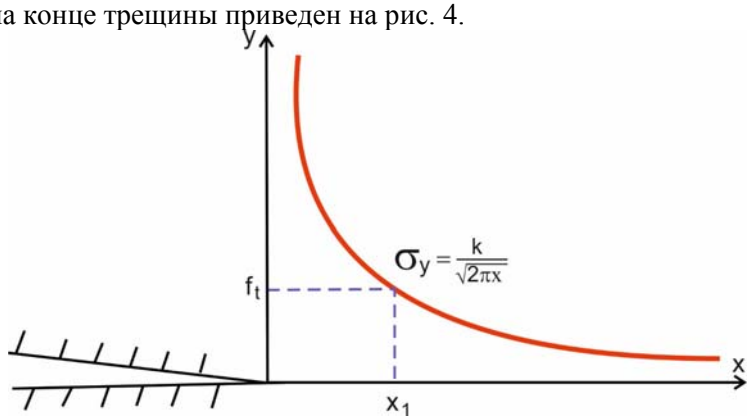


Рис. 4. Распределение напряжений на вершине трещины
на основе механики линейного упругого разрушения

Концентрация напряжения на конце трещины может быть выражена примерно следующим образом:

$$\sigma_y = \frac{k}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot x}}, \quad (1)$$

где σ_y – напряжение в направлении оси y, Па; k – коэффициент интенсивности напряжений, Па/м; x – расстояние от вершины трещины, м.

Коэффициент интенсивности напряжений k зависит от геометрии образца, условий нагружения и длины трещины. В первом режиме коэффициент интенсивности напряжения k_1 представляет общую интенсивность распределения напряжений. Коэффициент интенсивности напряжений первого режима некоторых распространенных геометрических форм приведен в таблице и показан на рис. 5.

Коэффициент интенсивности напряжений для первого режима некоторых распространенных геометрических форм

Тип трещины	Коэффициент интенсивности напряжений
a) Полубесконечная пластина с центрированной трещиной длиной $2a$	$k_1 = \sigma\sqrt{\pi \cdot a}$
b) Пластина конечной ширины $2W$ с центрированной трещиной длиной $2a$	$k_1 = \sigma\sqrt{\pi \cdot a}\left[\sec\left(\frac{\pi \cdot a}{2w}\right)\right] \times \times\left[1 - 0.025\left(\frac{a}{w}\right)^2 0.06\left(\frac{a}{w}\right)^4\right]$
c) Полубесконечная пластина с краевой трещиной длиной a	$k_1 = 1{,}12\,\sigma\sqrt{\pi \cdot a}$
d) Бесконечное тело с центральной трещиной в форме диска радиуса a	$k_1 = 2\sigma\sqrt{\frac{a}{\pi}}$

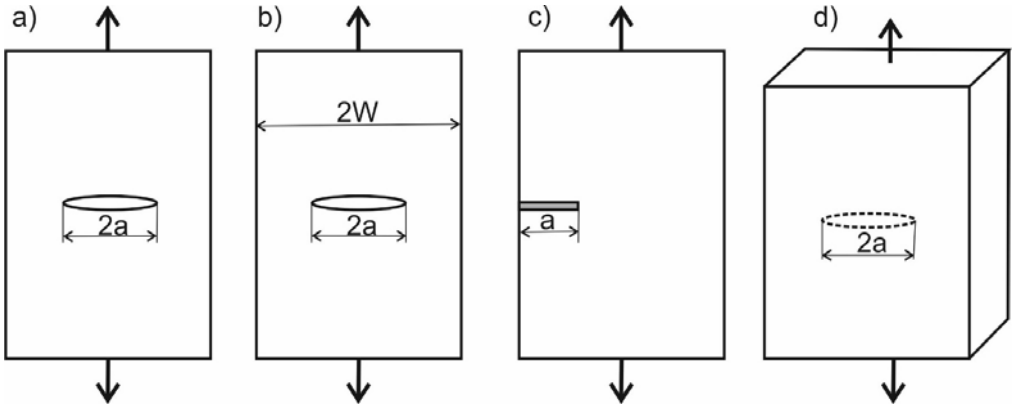


Рис. 5. Общие геометрии для определения коэффициентов интенсивности напряжений для первого режима

Выражение распределения напряжений на расстоянии x_1, показанное на рис. 4, становится недействительным, когда напряжения превышают предел прочности при растяжении. Тогда напряжение приближается к бесконечности, и поэтому нельзя оценить трещиностойкость и диффузию в отношении материала. Следует учитывать еще один критерий, который описывает трещиностойкость с точки зрения коэффициента интенсивности напряжений. Растрескивание начнет распространяться, как только коэффициент интенсивности напряжений k достигнет критической интенсив-

ности напряжений k_c; это значение является мерой твердости материала. Отказ напряжений σ_f задается:

$$\sigma_f = \frac{k_{1c}}{\alpha\sqrt{\pi.a}}, \quad (2)$$

где k_{1c} – критический коэффициент интенсивности напряжения для первого режима, Па/м; α – геометрический параметр.

Альтернативным способом описания напряженного состояния вблизи вершины трещины является подход на основе энергетического баланса. Согласно первым законам термодинамики, если система переходит из несбалансированного состояния в состояние равновесия, то происходит чистое уменьшение энергии. Этот закон был назван энергетическим стандартом Гриффита. Закон может быть легко описан как существующая трещина, которая подвержена тяговым силам на поверхности трещины. В этот момент напряжение и потенциальная энергия остаются постоянными, но это новое состояние не находится в равновесии. Для этого нужно уменьшить потенциальную энергию, чтобы достичь баланса. Вывод Гриффита указывает на образование трещины, в которой процесс приводит к уменьшению или сохранению постоянной общей энергии. Математическое выражение может быть сформулировано следующим образом :

$$\frac{dU}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{dW}{dA} = 0, \quad (3)$$

где dA – увеличивающаяся площадь трещины; U – общая энергия; Π – потенциальная энергия, получаемая за счет высвобождения энергии внутренней деформации; W – работа, необходимая для создания новых поверхностей трещин.

На рис. 6 показана половина бесконечной пластины, подвергнутой растягивающему напряжению. Треугольные области ширины a и высоты β_a разряжаются, в то время как остальные области подвергаются приложенному напряжению σ.

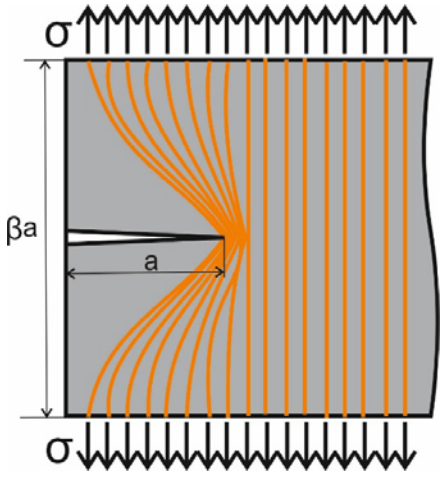


Рис. 6. Бесконечная пластина, подвергнутая растягивающему напряжению

Параметр β в этом случае определяется в соответствии с решением Инглиса и принимается $\beta=\pi$. Однако ученый представил работу с математической сложностью, когда трещина является острой. Гриффит разработал подход к энергетическому балансу при нормальном стрессе. Общая энергия напряжения

$$U = -\frac{\sigma^2}{2 \cdot E}\pi \cdot a^2, \quad (4)$$

где E – модуль Юнга, Па; a – длина трещины, м.

Энергия на поверхности S по отношению к длине трещины a равна:

$$S = 2\gamma a\,, \tag{5}$$

где γ – поверхностная энергия, Дж/м^2, и коэффициент 2 в уравнении (5) относятся к разделению пластины.

Термины, упомянутые в приведенных выше выражениях, могут быть записаны следующим образом:

$$S + U = 2\gamma a - \frac{\sigma^2}{2E}\cdot\pi a^2\,. \tag{6}$$

Первое выражение справа представляет уменьшение потенциальной энергии, а второе – увеличение поверхностной энергии, показанное на рис. 7.

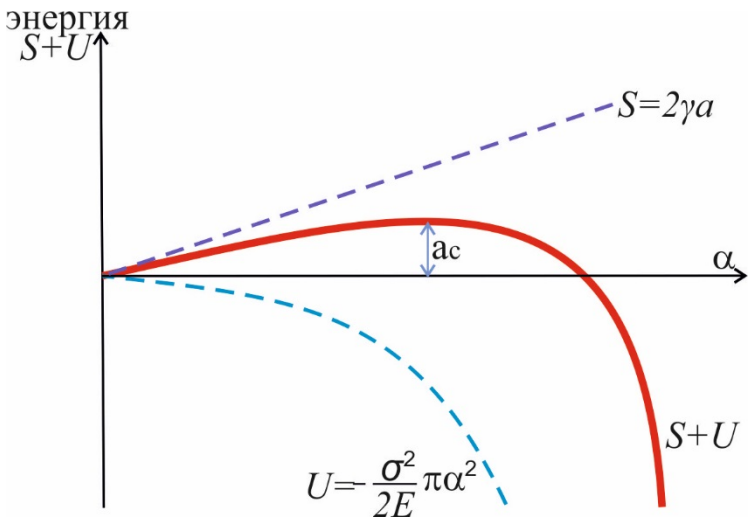


Рис. 7. Энергетический баланс разрушения

Увеличение уровня напряжения приведет к росту трещины a, и в конечном счете трещина достигнет критической длины a_c. Из рис. 7 видно, что квадратичная зависимость энергии напряжения будет доминировать над поверхностной энергией, которая преодолела критическую длину трещины. За пределами этой критической длины рост трещин нестабилен.

Можно показать, что первый вывод полной энергии относительно критической трещины удовлетворяется выражением

$$\frac{\delta\left(S+U\right)}{\delta a} = 2\gamma - \frac{\sigma_f^2}{E}\pi a = 0\,. \tag{7}$$

Это выражение можно переписать следующим образом:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}\,. \tag{8}$$

Хрупкие материалы обрабатываются, потому что оригинальная работа Гриффита была основана именно на стеклянных стержнях. Однако выражение (8) не является точным, когда речь идет о пластичности. Поэтому это выражение было разработано в отношении рассеивания энергии из-за потока пластических деформаций вблизи вершины трещины. Большой разрыв происходит, когда энергия деформации высвобождается с достаточной скоростью, которая является критической скоростью высвобождения деформации G_c и вводится следующим образом:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi a}}\,; \tag{9}$$

при a=1 видно, что энергия и интенсивность напряжения взаимосвязаны:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi a}} = \frac{k_{1c}}{\sqrt{\pi a}} \rightarrow k_{1c}^2 = EG_c . \quad (10)$$

Эта взаимосвязь применима для плоского напряжения. Для простого напряжения выражение задается как:

$$k_{1c}^2 = EG_c \left(1 - V^2\right). \quad (11)$$

Распространение трещины под действием жидкости – это процесс, при котором существующая трещина растягивается из-за давления жидкости. Бетонные конструкции, такие, как гравитационные плотины, постоянно реагируют на высокое давление воды. Существующие трещины заполняются большим количеством воды, которая проникает глубже в плотину, тем самым снижая ее несущую способность и целостность.

Гидростатическое давление, действующее на бетонные плотины, $\rho g h$ изменяется в зависимости от глубины h на поверхности плотины.

Растрескивание может привести к прогибу и деформации плотины, то есть к перемещениям и изменениям формы конструкции. Это также может привести к смещению, т.е. одна сторона треснувшей плотины перемещается относительно другой стороны плотины (рис. 8).

Рис. 8. Смещение из-за растрескивания

В ы в о д ы :

Последствия образования трещин в бетонных плотинах могут быть значительными. В конечном счете они снижают несущую способность конструкции или влияют на долговечность плотины.

В результате развития трещины происходит смещение поверхностей бетона снаружи или внутри трещины, что вызывает горизонтальные или вертикальные перемещения. Смещение может происходить перпендикулярно трещине и вызывать движение вверх и наружу относительно нижней части трещиноватой плотины.

Для предотвращения риска разрушения плотины из-за большого количества трещин необходимо разработать решения защиты плотины от трещин, вызванных воздействием внутреннего давления воды.

Список литературы

1. Бондаренко, В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004. – 472 с.

2. Мамедова, М.А. Исследование гидродинамических особенностей движения жидкостей в микротрещинных каналах / М.А. Мамедова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – №12. – С. 195–199.

3. Руководство по гидравлическим расчетам водосбросов бетонных и железобетонных плотин. – М., 2017. – 319 с.

4. Макридин, Н.И. Технология бетона, строительных изделий и конструкций / Н.И. Макридин, В.И. Калашников, К.Н. Махамбетова. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 192 с.

5. Марчук, А.Н. Статическая работа бетонных плотин / А.Н. Марчук. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.

References

1. Bondarenko, V.M. Computational models of the strength resistance of reinforced concrete / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov. – M.: DIA, 2004. – 472 p.

2. Mamedova, M.A. Investigation of hydrodynamic features of fluid motion in microcrack channels / M.A. Mamedova // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2018. – №12. – P. 195–199.

3. Guide to hydraulic calculations of spillways of concrete and reinforced concrete dams. – M., 2017. – 319 p.

4. Makridin, N.I. Technology of concrete, building products and structures / N.I. Makridin, V.I. Kalashnikov, K.N. Makhambetova. – Penza: PSUAC, 2014. – 192 p.

5. Marchuk, A.N. Static operation of concrete dams / A.N. Marchuk. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 208 p.

УДК 624.011.1 DOI 10.54734/20722958_2024_3_108

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77
Мартышкин Даниил Олегович,
аспирант кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: historical95@mail.ru

Penza State University of Architecture and Construction
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77
Martyshkin Daniil Olegovich,
Postgraduate of the Department «Building Structures»
E-mail: historical95@mail.ru

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ВКЛЕЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБ

Д.О. Мартышкин

Отмечено, что в соединениях деревянных конструкций используются механические рабочие связи. Повышение надежности узловых соединений достигается применением различного рода вкладышей, которые впрессовываются, вкладываются или вклеиваются в древесину соединяемых элементов, обеспечивая передачу усилий от одного элемента к другому. Соединения на вклеенных шайбах позволяют на относительно малой площади взаимного контакта передать значительные усилия, что обусловлено их высокой несущей способностью. Для обеспечения немагнитности, радиопрозрачности, аутентичности, коррозионной стойкости и уменьшения массы соединений в качестве материала шайб принят стеклотекстолит.

Установлено влияние параметров вклеенных стеклопластиковых шайб на несущую способность соединений деревянных конструкций. Представлена методика определения несущей способности соединений деревянных конструкций с применением вклеенных стеклопластиковых шайб. Представлены результаты испытаний образцов с различным диаметром и толщиной вклеенных шайб. Установлены критерий разрушения соединений и сходимость величин несущей способности вклеенных стеклопластиковых и стальных шайб.

Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение, несущая способность, разрушение, критерий оценки, стеклопластик, шайба, параметры

BEARING CAPACITY OF WOODEN STRUCTURES CONNECTIONS WITH VARIOUS PARAMETERS OF GLUED FIBERGLASS WASHERS

D.O. Martyshkin

Mechanical working connections are used in the joints of wooden structures. Increasing the reliability of nodal connections is achieved by using various types of inserts that are pressed, embedded or glued into the wood of the connected elements, ensuring the transfer of forces from one element to another. The connections on the glued washers allow significant forces to be transmitted over a relatively small area of mutual contact, due to their significant bearing capacity. To ensure non-magnetism, radio transparency, authenticity, corrosion resistance and reduction of the mass of the joints, fiberglass has been adopted as the material of the washers.

The influence of the parameters of glued fiberglass washers on the bearing capacity of joints of wooden structures has been established. A method for determining the bearing capacity of joints of wooden structures using glued fiberglass washers is presented. The results of testing samples with different diameters and thicknesses of glued washers are presented. A criterion for the destruction of compounds has been established. The convergence of the values of the bearing capacity of the glued fiberglass and steel washers has been established.

Keywords: wooden structures, connection, bearing capacity, destruction, evaluation criteria, fiberglass, washer, parameters

Введение

Наиболее распространёнными решениям узловых соединений деревянных конструкций (ДК) являются: вклеенные стержни по системе ЦНИИСК, вклеенные пластины, металлические зубчатые пластины (МЗП), шпонки и шайбы [1-8]. На основе достоинств вклеенных стальных шайб [9-10] предлагается соединение, обеспечивающее немагнитность, радиопрозрачность, аутентичность соединений ДК и, вместе с тем, достаточно прочное соединение с применением вклеенных шайб из стеклотекстолита КАСТ-В [11-13]. В [11-13] представлены результаты испытаний трехсоставных и односоставных образцов с вклеенными стеклопластиковыми шайбами диаметром $D_ш$ 60 мм и толщиной $t_ш$ 6 и 10 мм: установлена высокая несущая способность образцов.

На основе натурных испытаний была поставлена цель установить влияние диаметра $D_ш$ и толщины $t_ш$ шайбы на несущую способность (НС) соединений.

Методика определения несущей способности

В качестве материала для деревянных элементов образцов принята древесина сосны 2-го сорта (СП 64.13330.2017). Шайбы изготовлены из стеклотекстолита КАСТ-В (ГОСТ 10292-74). Образцы на вклеенных стеклопластиковых шайбах изготавливались по технологии, описанной в [11]. Все образцы маркировались по каждой серии, в соответствии с требованиями, представленными в [12]. В качестве основного образца принят дощатый элемент с размерами a, b, c. Форма и размер образцов приняты с соблюдением шага расстановки шайб S_1 и S_3 на основе ранее проведенных испытаний [11-13]: привязка шайб вдоль слоев древесины S_1 – не менее $1{,}5D_ш$, поперек слоев S_3 – не менее $1D_ш$. Общий вид и размеры образцов показаны на рис. 1.

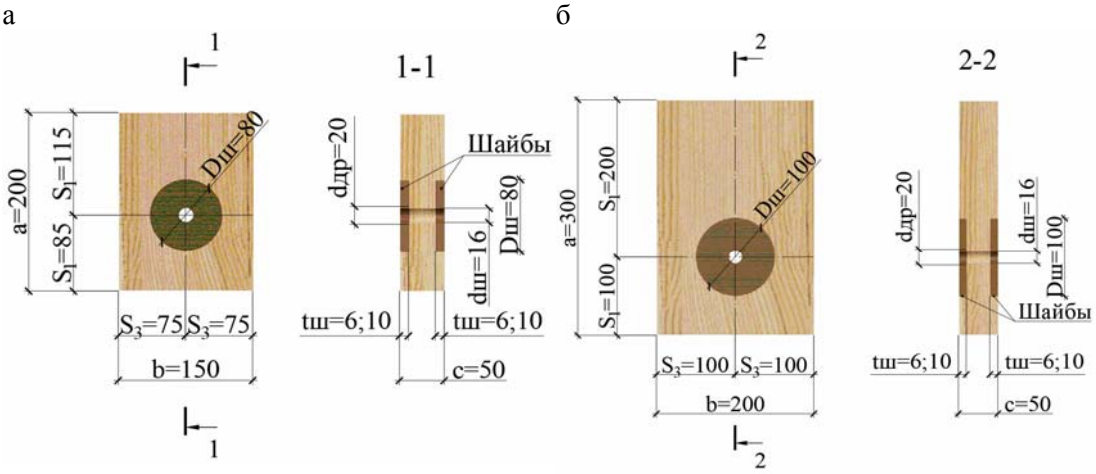


Рис. 1. Общий вид и размеры образцов серии ВШ-80-МН (а) и ВШ-100-МН (б)

Основные характеристики испытываемых образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики испытываемых образцов

Марка	Параметры					Кол-во образцов	Назначение серии образцов
	a, мм	b, мм	c, мм	$D_ш$, мм	$t_ш$, мм		
1	2	3	4	5	6	7	8
ВШ-80-6-МН-1	200	150	50	80	6	4	Передача нагрузки через металлические накладки
ВШ-80-6-МН-2							
ВШ-80-6-МН-3							
ВШ-80-6-МН-4							
ВШ-80-10-МН-1					10	4	
ВШ-80-10-МН-2							

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
ВШ-80-10-МН-3							
ВШ-80-10-МН-4							
ВШ-100-6-МН-1	300	200	50	100	6	3	
ВШ-100-6-МН-2							
ВШ-100-6-МН-3							
ВШ-100-10-МН-1					10	3	
ВШ-100-10-МН-2							
ВШ-100-10-МН-3							

Образцы испытывались по схеме, при которой нагружение образца производилось через металлические накладки, передающие усилия на шайбы (рис. 2, а). Для соединения металлических накладок и деревянного элемента с вклеенными шайбами принят стальной болт.

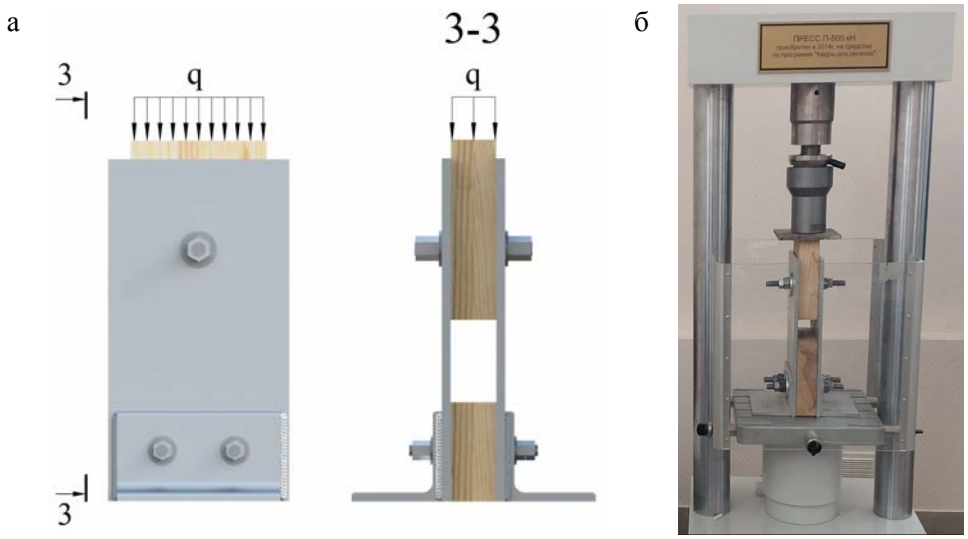


Рис. 2. Испытание образцов:
а – схема нагружения образца через металлические накладки;
б – образец в гидравлическом прессе П-500

Образцы испытывались на сжатие при нормальных температурно-влажностных условиях, т.е. при температуре 18-20^{o}С и относительной влажности воздуха W=60-65 %. Испытания проводились на гидравлическом прессе П-500 с максимальной нагрузкой 500 кН (рис. 2, б). На основе ранее испытанных образцов с вклеенными стеклопластиковыми шайбами [11-13] передача нагрузки на образцы осуществлялась непрерывно со скоростью нагружения 2 кН/мин. Скорость нагружения принималась непрерывной и равномерной с фиксацией начального и конечного времени. В процессе испытаний осуществлялся осмотр образцов. Результаты заносились в журнал испытаний.

Результаты испытаний

Исходя из ранее проведенных испытаний [11-13], на начальном этапе нагружение образцов производилось до 15-20 кН (в зависимости от диаметра и толщины вклеенных шайб) для обжатия шайб и исключения появления рыхлых деформаций, после чего сбрасывалось до 0. Далее образцы нагружались до полного разрушения. Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки приведены в табл. 2, графики нарастания деформаций сдвига ВШ-80-МН, ВШ-100-МН представлены на рис. 3, 4.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки

Марка образца	Диаметр шайбы $D_ш$, мм	Толщина шайбы $t_ш$, мм	Разрушающая нагрузка $P_{разр}$, кН
ВШ-80-6-МН-1	80	6	53,05
ВШ-80-6-МН-2			51,27
ВШ-80-6-МН-3			52,45
ВШ-80-6-МН-4			53,01
ВШ-80-10-МН-1	80	10	67,70
ВШ-80-10-МН-2			71,03
ВШ-80-10-МН-3			71,03
ВШ-80-10-МН-4			71,44
ВШ-100-6-МН-1	100	6	54,55
ВШ-100-6-МН-2			29,89
ВШ-100-6-МН-3			55,15
ВШ-100-10-МН-1	100	10	70,79
ВШ-100-10-МН-2			70,33
ВШ-100-10-МН-3			71,51

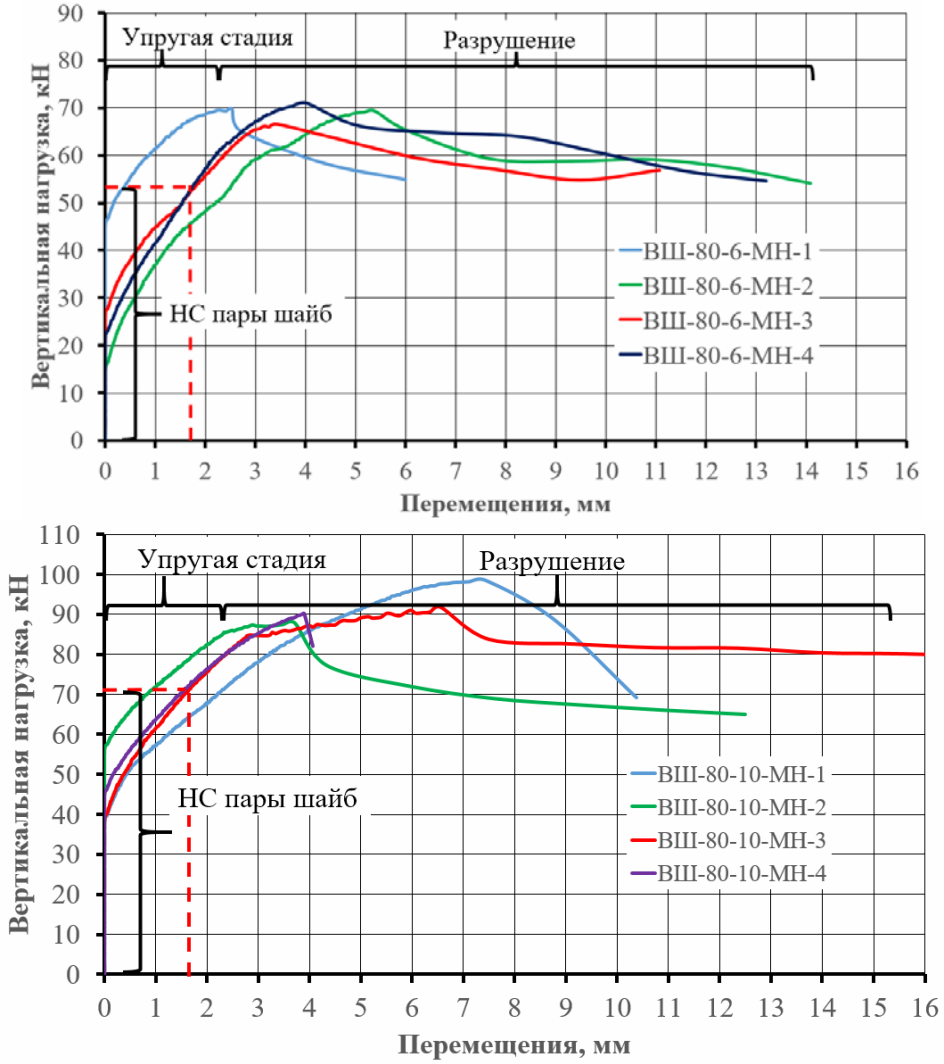


Рис. 3. Деформации сдвига в серии ВШ-80-МН

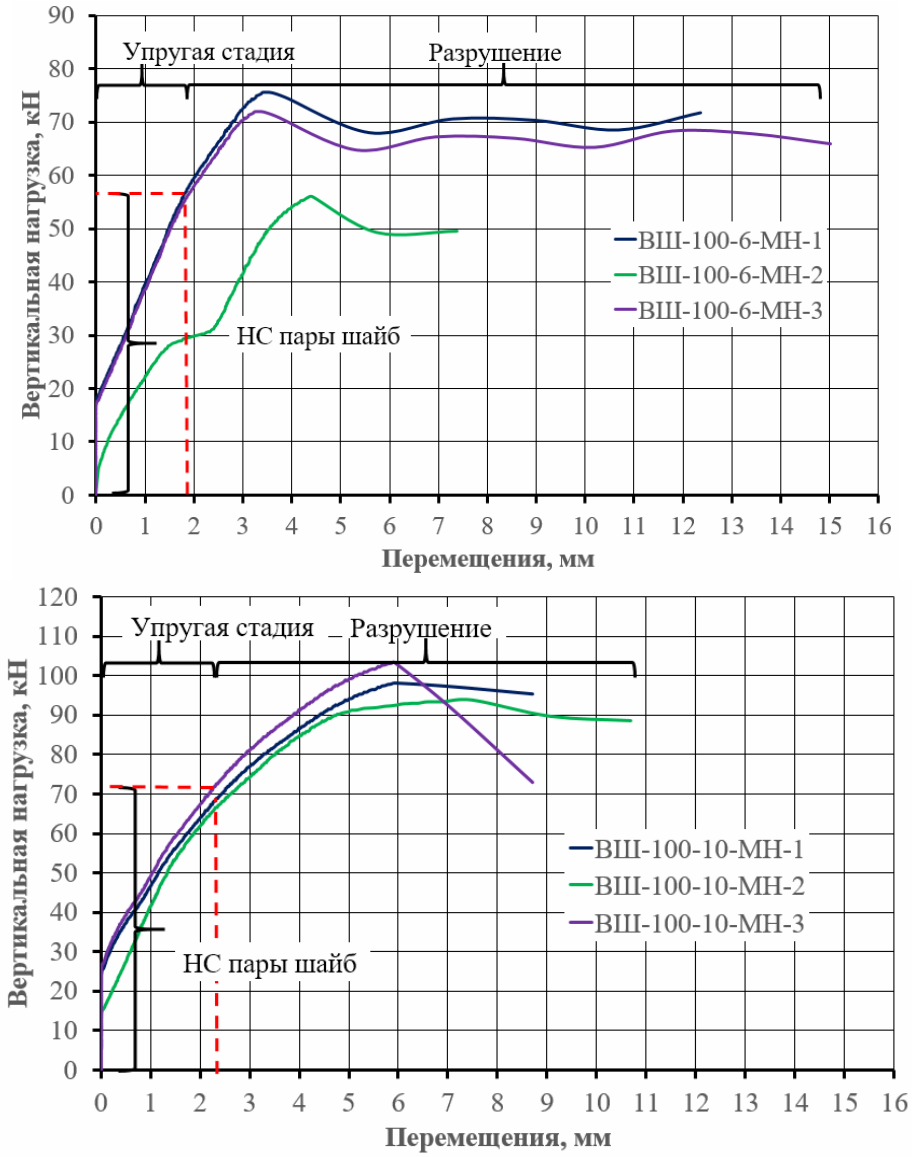


Рис. 4. Деформации сдвига в серии ВШ-100-МН

Согласно рис. 3, 4 упругая работа образцов составляет 25 кН (деформации отсутствуют или близи к нулю), после начинают возникать деформации сдвига. Далее происходит смятие шайбы под центровым болтом до включения в работу деревянного элемента образца, что отмечено в виде перегибов на графиках и проявляется характерным резким треском в процессе испытаний. В соответствии с СП 64.13330.2017 НС пары шайб образцов принимаем при деформациях сдвига, не превышающих 2 мм. Нагружение образцов продолжалось до полного разрушения. Как и в испытаниях образцов с вклеенными шайбами диаметром 60 мм и толщиной 6 и 10 мм [12-13], в первую очередь разрушается стеклопластиковая шайба, после чего происходит разрушение деревянного элемента. В связи с чем за разрушающую нагрузку/несущую способность пары шайб принимаем такую величину, при которой происходит смятие шайбы и включение в работу древесины (табл. 2). Величина разрушающей нагрузки пары шайб меньше, чем всего образца. Таким образом, заложен дополнительный запас прочности соединения. Общий вид разрушения образцов показан на рис. 5. Общее разрушение образца сопровождалось интенсивным ростом деформаций сдвига без заметного увеличения нагрузки на сравнительно большом промежутке времени.

а

ВШ-80-6-МН

ВШ-80-10-МН

б

ВШ-100-6-МН

ВШ-100-10-МН

Рис. 5. Общий вид разрушения образцов:
а – ВШ-80-МН; б – ВШ-100-МН

В образцах с вклеенными шайбами шайба воспринимает усилие сжатия от центрового болта (в ней возникают максимальные напряжения, что подтверждается численным моделированием [14]). Усилие сжатия с шайбы перераспределяется под шайбой, и происходит смятие древесины. На основе данных табл. 2 и деформаций сдвига (см. рис. 3, 4) установлено, что увеличение толщины шайбы пропорционально росту разрушающей нагрузки образцов, т.к. увеличивается площадь распределения усилия сжатия под болтом и шайбой. Однако результаты испытаний образцов с вклеенными шайбами с диаметром 80 и 100 мм показали сопоставимые результаты. На этом основании рассмотрим шайбы с диаметром 60 и 80 мм и толщиной 6 и 10 мм. Шайбы с диаметром 100 мм в соединениях деревянных конструкций можно применять конструктивно.

Несущая способность образцов при различных параметрах вклеенных стеклопластиковых шайб

Определим влияние параметров вклеенных стеклопластиковых шайб (диаметра $D_ш$ и толщины $t_ш$) на несущую способность образцов. Как отмечено ранее, несущие способности образцов с диаметром вклеенных шайб 80 и 100 мм сопоставимы. На этом основании рассмотрим среднюю разрушающую нагрузку образцов с диметром 60 и 80 мм и толщиной 6 и 10 мм соответственно. Несущие способности пары вклеенных стеклопластиковых шайб образцов серии ВШ-60-6-МН, ВШ-60-10-РМ [12-13], ВШ-80-6-МН, ВШ-80-10-МН приведены в табл. 3 и показаны на рис. 6.

Таблица 3

Несущая способность пары вклеенных стеклопластиковых шайб образцов серии ВШ-60-6-МН, ВШ-60-10-РМ, ВШ-80-6-МН, ВШ-80-10-МН

Марка образца	Диаметр шайбы $D_ш$, мм	Толщина шайбы $t_ш$, мм	Средняя разрушающая нагрузка $P_{разр}$, кН
ВШ-60-6-МН	60	6	43,42
ВШ-60-10-РМ		10	54,79
ВШ-80-6-МН	80	6	52,45
ВШ-80-10-МН		10	70,30

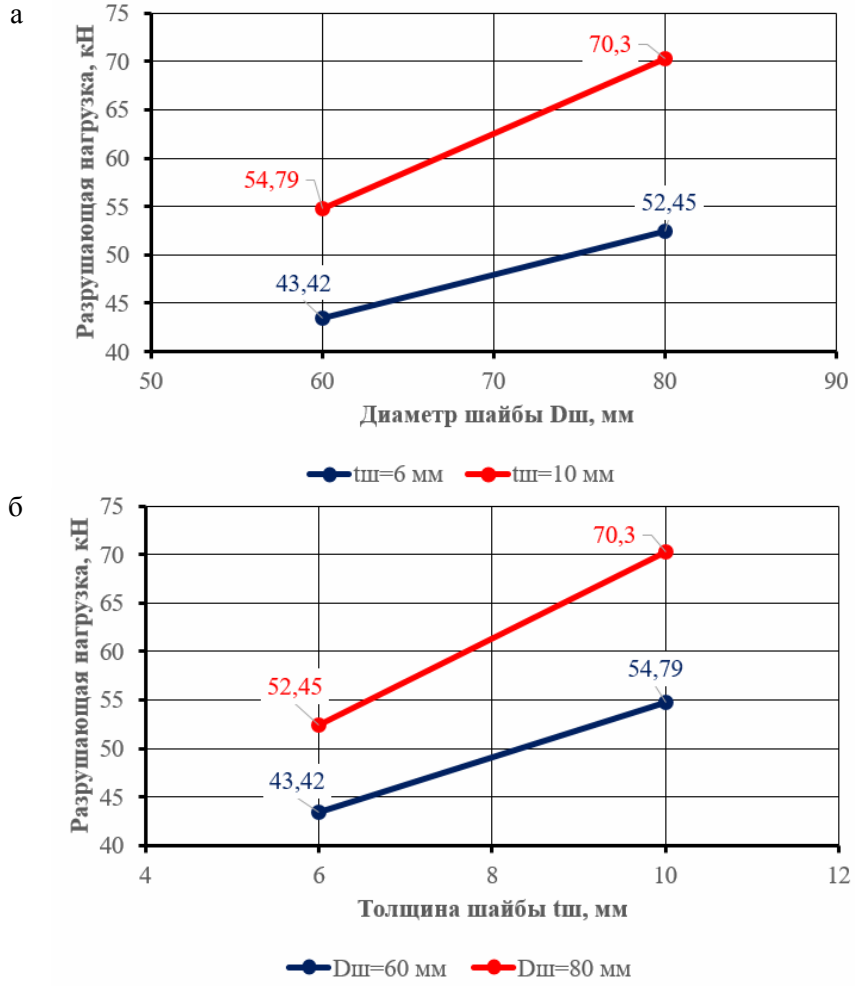


Рис. 6. Зависимость средней разрушающей нагрузки образцов от диаметра $D_ш$ (а) и толщины $t_ш$ (б) шайбы

Согласно данным табл. 3 можно сделать вывод, что при увеличении диаметра $D_ш$ от 60 до 80 мм и толщины шайбы $t_ш$ от 6 до 10 мм увеличивается разрушающая нагрузка образцов. С увеличением толщины шайба воспринимает большие усилия, передаваемые с центрового болта, и увеличивается несущая способность соединения деревянных конструкций. Следует отметить, что шайбы диаметром $D_ш$=100 мм и толщиной $t_ш$ = 6 мм и 10 мм также можно использовать в несущих деревянных конструкциях.

Несущая способность образцов на вклеенных стальных и стеклопластиковых шайбах

На основе результатов натурных испытаний необходимо сравнить НС образцов на вклеенных шайбах из стеклотекстолита КАСТ-В и металла (рис. 7, 8) [15]. Приняв за НС пары стальных шайб при тех же величинах деформаций сдвига, что и образцы на

шайбах из стеклотекстолита КАСТ-В (диаметр 60 и 80 мм и толщина 6 и 10 мм), можно сделать вывод, что величины НС сопоставимы, что подтверждает практическую значимость и перспективность применения соединений на вклеенных стеклопластиковых шайбах в несущих деревянных конструкциях.

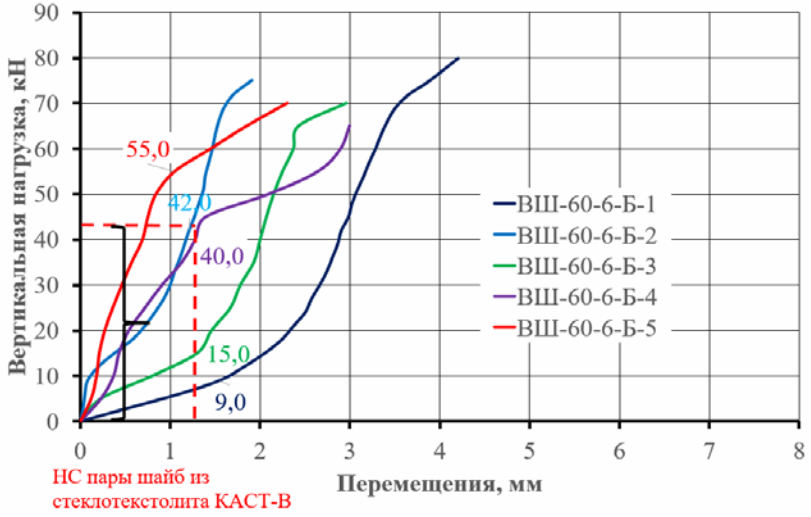


Рис. 7. Деформации сдвига в серии ВШ-60-6-Б образцов на вклеенных стальных шайбах

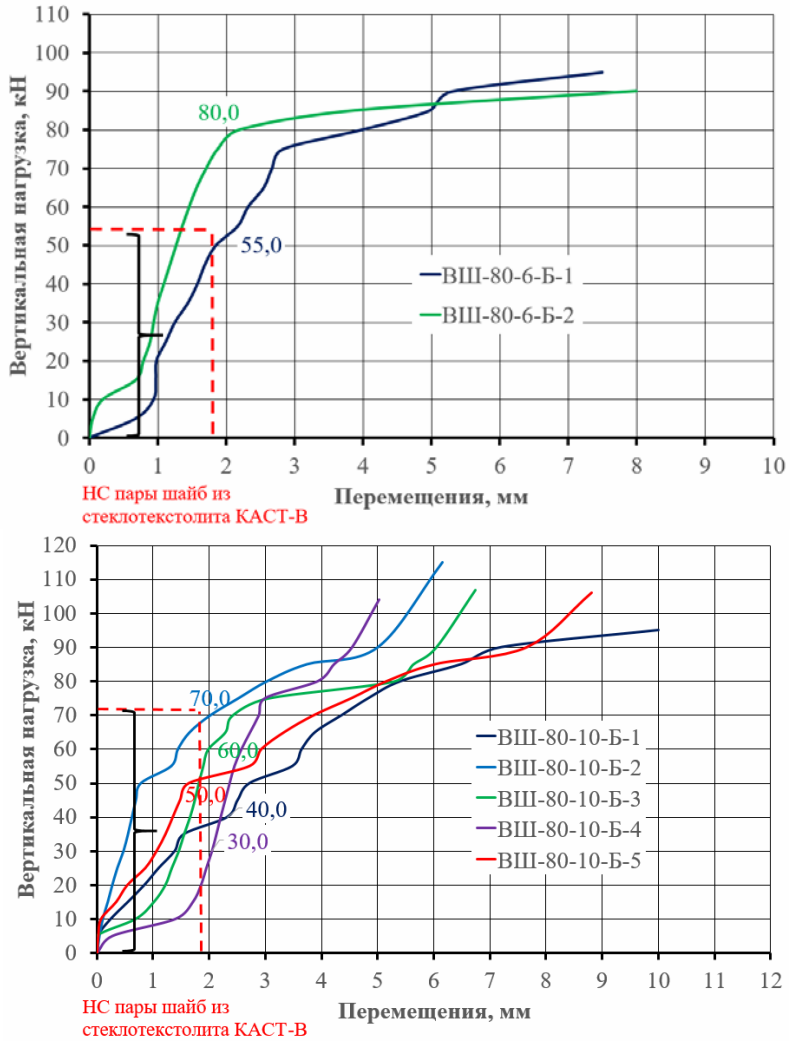


Рис. 8. Деформации сдвига в серии ВШ-80-Б образцов на вклеенных стальных шайбах

Как отмечалось, при испытаниях образцов использовался стальной болт. Для обеспечения коррозионной стойкости в соединениях деревянных конструкций целесообразно использовать оцинкованные болты, подверженные гальванической обработке. Также в качестве альтернативы можно рассмотреть вариант применения болтов из композитных материалов.

Выводы

1. При увеличении диаметра и толщины вклеенных стеклопластиковых шайб, несущая способность соединений деревянных конструкций увеличивается.
2. Разрушение вклеенных стеклопластиковых шайб принято в качестве критерия разрушения соединения.
3. Величины несущей способности соединений на вклеенных стеклопластиковых и стальных шайбах при одинаковых параметрах диаметра и толщины сопоставимы.
4. Подтверждены практическая значимость и перспективность применения соединений на вклеенных стеклопластиковых шайбах в несущих деревянных конструкциях.

Список литературы

1. Турковский, С.Б. Клееные деревянные конструкции с узлами на вклеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) / С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев, И.П. Преображенская. – М.: РИФ «Стройматериалы», 2013. – 308 с.
2. Вдовин, В.М. Вклеенные кольцевые шпонки в соединениях деревянных конструкций / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов, М.С. Галахов. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 171 с.
3. Римшин, В.И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах / В.И. Римшин, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов [и др.] // Вестник МГСУ. – 2016. – № 9. – С. 35–50.
4. Попов, Е.В. Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных с применением зубчатых шайб «Bulldog» / Е.В. Попов, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – Курск, 2015. – С. 189–198.
5. Аркаев, М.А. Усиление деревянных конструкций с использованием витых крестообразных нагелей / М.А. Аркаев, В.И. Жаданов, Г.А. Столповский // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – №5. – С. 23–29.
6. Линьков, В.И. Конструкции на основе деревянных элементов составного сечения с соединениями на наклонных металлических стержнях без применения клея / В.И. Линьков // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 11. – С. 29–31.
7. Руднев, И.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением вклеенных стальных пластин / И.В. Руднев, В.И. Жаданов, С.В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – №4. – С. 5–12.
8. Лисицкий, И.И. Деревянные фермы с узловыми соединениями на вклеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – №4. – С. 9–15.
9. Вдовин, В.М. Вклеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: монография / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.
10. Ишмаева, Д.Д. Жесткие узлы клееных деревянных балочных элементов на вклеенных стальных шайбах / Д.Д. Ишмаева, В.М. Вдовин // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – №1. – С. 189–195.
11. Вдовин, В.М. Коррозионно-стойкое немагнитное соединение элементов деревянных конструкций / В.М. Вдовин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №4(41). – С. 103–108.
12. Арискин, М.В. Соединения на вклеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях / М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2(51). – С. 96–103.

13. Мартышкин, Д.О. Несущая способность соединений деревянных конструкций с вклеенными стеклопластиковыми шайбами различной толщины / Д.О. Мартышкин, М.В. Арискин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №1(54). – С. 108–114.

14. Ariskin, M.V. Mathematical modeling of stress-strain state of elements of joints of wooden structures on glued fiberglass washers / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin, I.V. Vanin // J. Phys.: Conf. 2021. Сер. 2131 032095.

15. Арискин, М.В. Совершенствование клееметаллических соединений деревянных конструкций с применением стальных шайб: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/ М.В. Арискин. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 190 с.

References

1. Turkovsky, S.B. Glued wooden structures with joints on glued rods in modern construction (System of TsNIISK) / S.B. Turkovsky, A.A. Pogoreltsev, I.P. Preobrazhenskaya. – M.: RIF «Building Materials», 2013. – 308 p.

2. Vdovin, V.M. Ring dowel glued in timber structures joints / V.M. Vdovin, V.N. Karpov, M.S. Halachov. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2011. – 171 p.

3. Rimshin, V.I. Connections of elements of wooden structures on dowels and washers / V.I. Rimshin, B.V. Labudin, V.I. Melekhov [et al.] // MSUCE Bulletin. – 2016. – No 9. – P. 35–50.

4. Popov, E.V. Testing for shear of elements of wooden structures connected using toothed washers «Bulldog» / E.V. Popov, B.V. Labudin, V.I. Melekhov // Safety of the construction industry in Russia. Problems and Solutions. – Kursk, 2015. – P. 189–198.

5. Arkaev, M.A. Strengthening of wooden structures using twisted cross-shaped nails / M.A. Arkaev, V.I. Zhadanov, G.A. Stolpovsky // Industrial and Civil Construction. – 2017. – No 5. – P. 23–29.

6. Linkov, V.I. Structures based on composite-section wooden elements with connections on inclined metal rods without using glue / V.I. Linkov // Industrial and Civil Construction. – 2012. – No 11. – P. 29–31.

7. Rudnev, I.V. Connections of wooden constructions elements with the use of the pasted steel plates / I.V. Rudnev, V.I. Zhadanov, S.V. Lisov // News of higher educational institutions. Construction. – Novosibirsk: – 2014. – No4. – P. 5–12.

8. Lisitsky, I.I. Wooden trusses with nodal joints on glued flat rods / I.I. Lisitsky, V.I. Zhadanov // Industrial and civil engineering. – 2020. – No4. – P. 9–15.

9. Vdovin, V.M. Glued metal washers in the joints of wooden structures: monograph / V.M. Vdovin, M.V. Ariskin, D.D. Dudorova. – Penza: PGUAS, 2012. – 184 p.

10. Ishmaeva, D.D. Rigid connections of glued wooden beam elements on glued steel washers / D.D. Ishmaeva, V.M. Vdovin // Bulletin of Orenburg State University. – 2014. – No1. – P. 189–195.

11. Vdovin, V.M. Corrosion-resistant non-magnetic connection of elements of wooden structures / V.M. Vdovin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2019. – No4(41). – P. 103–108.

12. Ariskin, M.V. Connections on glued fiberglass washers in wooden structures / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No2(51). – P. 96–103.

13. Martyshkin, D.O. Bearing capacity of wooden structures connections with different thickness of glued fiberglass washers / D.O. Martyshkin, M.V. Ariskin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No1(54). – P. 108–114.

14. Ariskin, M.V. Mathematical modeling of stress-strain state of elements of joints of wooden structures on glued fiberglass washers / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin, I.V. Vanin // J. Phys.: Conf. 2021. Сер. 2131 032095.

15. Ariskin, M.V. Improvement of glue-metal connections of wooden structures using steel washers: dissertation for the degree of candidate of technical sciences: 05.23.01 / M.V. Ariskin. – Penza: PGUAS, 2011. – 190 p.

УДК 691.328.1 DOI 10.54734/20722958_2024_3_118

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

Тарасеева Нелли Ивановна,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Геотехника и дорожное строительство»
E-mail: gds@pguas.ru

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина. Ю.А.
Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, д. 77,
тел.: +7 (8452) 99-85-74

Раткин Василий Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Транспортное строительство»
E-mail: tst@sstu.ru

Цирулев Игорь Викторович,
аспирант кафедры «Транспортное строительство»
E-mail: tst@sstu.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

Taraseeva Nelly Ivanovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Geotechnics and Road Construction»
E-mail: gds@pguas.ru

Saratov State Technical University named after. Gagarin. Yu.A.
Russia, 410054, Saratov,
77, Politekhnicheskaya St.,
tel.: +7 (8452) 99-85-74

Ratkin Vasily Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Transport Construction»
E-mail: tst@sstu.ru

Cirulev Igor Viktorovich,
Postgraduate student of the Department «Transport Construction»
E-mail: tst@sstu.ru

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Н.И. Тарасеева, В.В. Раткин, И.В. Цирулев

Приведены результаты всестороннего анализа базовых теоретических понятий и практических результатов влияния агрессивных факторов эксплуатации, как природных, так и техногенных, на железобетонные транспортные сооружения на автомобильных дорогах. Изучена электрохимическая природа коррозии стальных элементов и конструкций моста, анодного окисления и катодного восстановления на поверхности арматурных элементов как этапов формирования новообразований гидратированных окислов железа – ржавчины. Приведены данные о процессе карбонизации бетона на основе лабораторно-практических испытаний и натурных исследований поведения образцов бетона в различных агрессивных средах. Выявлено влияние химических компонентов окружающей среды (газов, кислот, растворов солей), температурно-влажностного режима на изменение плотности бетона и, как результат, ухудшение прочностных показателей несущих конструкций. Показано, что комплексная оценка процессов и явлений карбонизации, развития ее параметров во времени имеет важное значение для прогнозирования изменения технического состояния транспортных сооружений с момента изготовления и в течение срока эксплуатации.

Ключевые слова: автомобильные дороги, транспортные сооружения, железобетон, арматура, агрессивная среда, коррозия, карбонизация, прочность

SCIENTIFIC, THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF THE AGGRESSIVE ENVIRONMENTS IMPACT ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF TRANSPORT FACILITIES

N.I. Taraseeva, V.V. Ratkin, I.V. Cirulev

A comprehensive analysis of the basic theoretical concepts and practical results of the influence of aggressive operating factors, both natural and man-made, on reinforced concrete transport structures on highways has been carried out. The electrochemical nature of corrosion of steel elements and bridge structures, anodic oxidation and cathodic reduction on the surface of reinforcing elements as stages of the formation of new formations of hydrated iron oxides – rust – have been studied. Data are presented on the process of carbonization of concrete based on laboratory and practical tests and field studies of concrete samples behavior in various aggressive environments. The influence of chemical components of the environment (gases, acids, salt solutions), temperature and humidity conditions on concrete density changes and, as a result, deterioration in the strength parameters of load-bearing structures has been revealed. It is shown that a comprehensive assessment of the processes and phenomena of carbonization, the development of its parameters over time is important for predicting changes in the technical condition of transport structures from the moment of manufacture and during their service life.

Keywords: highways, transport structures, reinforced concrete, reinforcement, aggressive environment, corrosion, carbonization, strength

Введение

С момента появления и по настоящее время железобетон является широко распространенным материалом в промышленно-гражданских и транспортных сооружениях. Предполагалось, что найден тот самый материал, сроки службы которого будут измеряться столетиями, однако уже первые десятилетия эксплуатации показали вероятность разрушения данного конструкционного материала под воздействиями окружающих агрессивных сред.

Транспортные сооружения – важнейшие элементы авто- и железнодорожной инфраструктуры, обеспечивающие беспрерывное перемещение по пересеченной местности. К категории инженерных сооружений, которые оказывают влияние на экономику государства, безопасность и комфорт населения, относят в первую очередь автомобильные, железнодорожные, пешеходные и совмещенные мосты. Большое количество типовых проектов доказывает массовое распространение железобетона, но внушительный срок службы в совокупности с растущими нагрузками, влияние агрессивных сред создают риск деформаций, преждевременного износа, аварий и крушений мостов и путепроводов.

Задачу данного исследования определила необходимость изучения процессов взаимодействия основных элементов с агрессивными средами, поскольку опыт наблюдения за дефектами и изменениями в железобетонных конструкциях показывает существенное влияние физических и химических факторов воздействий на возникновение коррозии различных видов.

1. Электрохимическая природа коррозии

Процесс коррозии стальных элементов и конструкций в подавляющем большинстве имеет электрохимический механизм: он происходит в присутствии влаги на поверхности стальных элементов с образованием анодных и катодных участков, при этом на первых осуществляется растворение металла (анодное окисление), ионизация атомов, переходящих в виде гидратированных анионов в раствор. Образовавшиеся свободные электроны остаются в кристаллической решетке металла, перемещаются к катодным участкам его поверхности, где протекает ассимиляция либо атомами растворенного кислорода, либо ионами водорода (катодное восстановление). Электрическая цепь замыкается через раствор электролита, в котором происходит перемещение гидратированных ионов.

Установлено, что продукты коррозии являются результатом вторичных процессов взаимодействия гидратированных ионов с кислородом. При этом наблюдаются следующие зависимости: хорошо растворимые могут переноситься от места их образо-

вания; труднорастворимые, какими являются, как правило, продукты коррозии стали, откладываются на поверхности, образуя более или менее четко выраженный растущий слой ржавчины, состоящий из оксидов и гидроксидов железа.

В [1] указаны необходимые условия для протекания процесса электрохимической коррозии:

- наличие активных участков поверхности металла, способных к анодному растворению, т.е. переходу атомов в растворимые ионы по реакции

$$Fe^{2+} + 2e \leftarrow Fe; \quad (1)$$

- наличие веществ, необходимых для протекания катодной реакции, например с восстановлением кислорода:

$$O_2 + 4e + 2H_2O \rightarrow 4OH^-; \quad (2)$$

- наличие электролита, в котором может осуществляться движение ионов между анодом и катодом.

В качестве электролита выступают растворы солей, попадающие на конструкции моста в составе противоморозных смесей с проезжей части или из эксплуатируемой среды. Катодный и анодный процессы проявляются на разных участках железобетонных опор или пролетных строений, при этом в растворе происходит направленное перемещение ионов: электроны, избыточные у анодов, передвигаются в металле к катодам (рис. 1). Возникает электрический ток, называемый током коррозии. Продукты коррозии образуются в результате вторичных реакций в электролите:

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2; \quad (3)$$

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3. \quad (4)$$

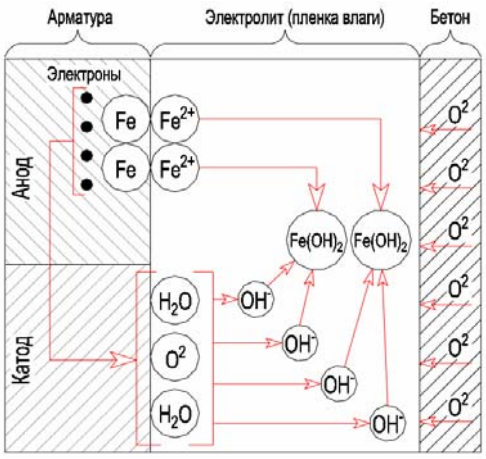


Рис. 1. Схема процесса коррозии в железобетоне

Очевидно, что повышенное увлажнение, к примеру, мостового сооружения через водное препятствие приводит к насыщению бетона солями и активации процессов карбонизации. Возможным способом уменьшения коррозии может выступить катодная защита, реализуемая при увеличении защитного слоя в месте расположения арматуры и максимально возможной плотности бетона.

2. Коррозия бетона и железобетона

На железобетонные конструкции мостовых сооружений оказывают негативное влияние следующие физические и химические воздействия: влага, температурные перепады, грунтовые воды, среды с содержанием агрессивных химических элементов. Установлено, что совокупность этих факторов приводит к ухудшению состояния и разрушению основных конструкций от действия коррозии (рис. 2).

Рис. 2. Характерные дефекты и повреждения элементов моста:
а – разрушение защитного слоя и коррозия арматуры плиты сталежелезобетонного пролетного строения моста; б – то же, балок путепровода; в – то же, ригеля и тела опоры моста;
г – разрушение конструкции перильного ограждения моста

В [2] указана классификация коррозии бетона и железобетона в жидких средах:

- I вид – коррозия, связанная с воздействием водных сред с малым содержанием солей с преимущественно нейтральной реакцией (pH=6,8÷7,2);
- II вид – коррозия при воздействии весьма агрессивных сред, например кислот, щелочей, некоторых солей, таких, как хлориды натрия или магния;
- III вид – коррозия, обусловленная проникновением в поры бетона жидких сред, содержащих компоненты, образующие с поровой жидкостью или цементным камнем нерастворимые кристаллические соединения.

Карбонизация бетона

Карбонизация бетона является основным видом коррозии в воздушных средах. Углекислый газ является наиболее распространенным из агрессивных: среднее содержание в атмосфере сельской местности составляет 0,03 %, в промышленных районах и в воздухе заводских цехов его содержание может быть гораздо выше. Карбонизация приводит к изменению физико-химических характеристик цементного камня, структурным преобразованиям, уменьшению защитных свойств по отношению к арматуре, развитию разрушительных процессов различной степени интенсивности в металле конструкций и, как результат, – снижению несущей способности железобетона [3].

Интерес и стимул для более глубоких исследований поведения бетона в агрессивной воздушной среде представляют уточненные в работе [4] результаты 25-летних измерений концентрации CO_2 в атмосфере на станции «Иссык-Куль», которые показывают увеличение средней месячной концентрации CO_2 с 341 до 382 млн$^{-1}$.

Пористая структура активно поглощает углекислоту, вследствие чего происходят реакции щелочных компонентов цементного камня с диоксидом углерода с образованием карбонатов. Процесс карбонизации протекает в три ступени: сначала диффундирует из воздуха CO_2, проникает через поверхность бетона в систему пор; далее

углекислый газ превращается частично в угольную кислоту; последним шагом являются реакции CO_2 с щелочными компонентами цементного камня, растворенными в поровой влаге. Упрощенно карбонизацию гидроксида кальция можно представить в форме

$$Ca(OH)_2 + C_2O + O_2 \xrightarrow{H_2O} CaCO_3 + H_2O. \quad (5)$$

Все исследования изменения свойств бетона во времени базируются на основном уравнении, которое выведено авторами работы [5]:

$$x = A\sqrt{\tau}, \quad (6)$$

где x – толщина нейтрализованного слоя по фенолфталеиновой пробе, см; τ – время службы конструкции, с; A – коэффициент, определяемый по формуле

$$A = \sqrt{\frac{2D'C}{m_0}}; \quad (7)$$

здесь D' – эффективный коэффициент диффузии CO_2, см^2/с; C – концентрация CO_2 в атмосфере в относительных единицах по объему; m_0 – реакционная емкость бетона, см^3.

Практический интерес представляют исследования [5] на предварительно напряженных балках с размерами 10×10×150 см, армированных высокопрочной сталью; использованы 6 видов цемента с расходом 300 кг/м^3 и В/Ц=0,56÷0,65; толщина защитного слоя 5, 10, 15 и 20 мм. Для оценки влияния кислых газов воздушной среды балки установили в 5 различных местах:

а) в центре промышленного города;

б) в районе металлургического завода (Рур);

в) на берегу Северного моря;

г) в помещении с высокой влажностью воздуха и содержанием углекислого газа от 5 до 30 %;

д) контрольные образцы – в лабораторном помещении при относительной влажности воздуха 65 % и температуре 20°С.

Глубину карбонизации оценивали после 4 лет хранения в агрессивной среде (табл. 1).

Таблица 1

Глубина карбонизации бетона

Тип цемента	Глубина карбонизации, мм				
	Место расположения балок (см. выше)				
	а	*б*	*в*	*г*	*д*
Портландцемент PZ475	0-1	3-6	1	0-2	1-3
Портландцемент PZ375	0-1	4-6	1-5	3-6	2-3
Сульфатостойкий	2-4	2-5	3-6	3-8	3-6
Шлакопортладцемент EPZ	1-3	4-7	6-10	4-7	3-6
Шлакопортладцемент (50 % шлака)	2-4	7-12	6-10	8-11	8-10
Шлакопортладцемент (80 % шлака)	2-5	5-8	7-10	12-18	9-12

Из таблицы следует, что:

- карбонизация идет наиболее быстро в сухом помещении; во влажном, несмотря на повышенное содержание CO_2, ее значения не превышают полученные в сухой комнате при нормальном содержании углекислого газа;
- независимо от условий наименьшая глубина карбонизации образцов на портландцементе средняя – у бетона на сульфатостойком и шлакопортландцементах, наибольшая – на шлакопортландцементе с содержанием шлака 50 и 80 %.

Сделаны выводы:

- коррозия арматуры начинается, как только зона карбонизации распространится до поверхности арматуры;

• поверхность металлических стержней со стороны защитного слоя обычно поражена сильнее, чем противоположная;

• даже там, где карбонизация отсутствовала или была незначительной, защитный слой толщиной 5-7 мм недостаточен, поскольку возникают локальные очаги поражения со значительными потерями металла в местах, где имеются сквозные капиллярные поры от поверхности бетона до стали;

• от начальных очагов (поры или места глубокой карбонизации) коррозия распространяется как вглубь арматуры, так и по ее поверхности, а именно: первое наблюдается в медленно карбонизирующем бетоне (особенно у капиллярных пор) и при агрессивных условиях, второе – в быстро карбонизирующем бетоне.

Воздействие различных агрессивных сред на железобетон

В процессе эксплуатации конструктивных элементов моста арматура относительно долгое время находится под защитой слоя бетона. Со временем частицы агрессивной среды мигрируют к поверхности металлических стержней через структурные дефекты (поры и микротрещины), образующиеся при разрушении конструктивных элементов [1]. При взаимодействии со средами, содержащими хлорид-ионы, образуется растворимый хлорид кальция:

$$Ca(OH)_2 + 2HCl \rightarrow CaCl_3 + H_2O. \quad (8)$$

Как известно, добавка хлорида кальция в количестве, соответствующем нормативным требованиям, позволяет улучшать противоморозные свойства, однако длительное воздействие агрессивной среды с образованием подобных солей увеличивает осадку бетона, уменьшает прочность на изгиб, в том числе за счет образования коррозии арматуры.

В атмосфере городов и многих промышленных предприятий широко распространен и содержится в значительном количестве сернистый газ. Принципиально его действие на бетон не отличается от действия CO_2; продуктом реакции является обычно двуводный гипс:

$$Ca(OH)_2 + SO_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow CaSO_4 + 2H_2O. \quad (9)$$

В исследовании [6] проверялось действие различных газовых сред на призматические образцы армированных бетонов различной плотности сечением 5×5×15 см. Бетон готовился на речном песке и известняковом щебне с расходом портландцемента 250, 300 и 500 кг/м^3, водоцементное отношение составило 0,736, 0,55 и 0,38 соответственно. Толщина защитного слоя 15 мм.

После трехмесячного хранения в нормальных условиях образцы поместили в различные газовые среды:

1) воздушно-сухая (помещение лаборатории);

2) воздушно-влажная (относительная влажность 80 % при температуре 30°С с повышенным содержанием углекислоты и кислорода);

3) то же, с переменной температурой (относительная влажность 100 % при температуре от 20°С до 70°С);

4) то же, с содержанием хлористого водорода концентрации 10 мг/л (относительная влажность 36 %)

5) то же, с содержанием хлористого водорода концентрации 100 мг/л (относительная влажность 21 %);

6) то же, с содержанием сернистого газа концентрации 100 мг/л (влажность 100 %);

7) то же, с содержанием сернистого газа концентрации 500 мг/л (относительная влажность 99,4 %).

В процессе эксперимента концентрации агрессивных газов создавались в замкнутом объеме над раствором соответствующей летучей кислоты, который меняли один раз в месяц. Образцы периодически осматривали, проверяли глубину нейтрализации

бетона путем пробы фенолфталеином на свежем изломе, оценивали состояние арматуры. Установлено, что карбонизация бетона идет тем быстрей, чем меньше его плотность. Также наиболее быстро данный процесс протекает при относительной влажности 80 % (среда №2). В воздушных средах (№1–3) арматура не подверглась коррозии, за исключением среды №3, где поражение металлических стержней наблюдалось в образце с наименее плотным бетоном.

Установлено: газовая среда с хлористым водородом более агрессивна к бетону. Процесс разрушения композиционного материала идет неравномерно и тем быстрее, чем меньше его плотность. С величиной разрушения бетона и плотностью прямо связана степень коррозии арматуры (табл. 2).

Таблица 2

Состояние образцов после хранения в среде №5

Продолжительность хранения в месяцах	Расход цемента, кг/м^3	Состояние бетона	Площадь повреждения поверхности арматуры, %
10	250	Крошение	4
10	350		2
10	500		0
19	250	Полное разрушение	35
19	350	Разрушение на 13,5 мм	40
19	500	Разрушение на 11 мм	10

Процесс коррозии арматуры зависит от состояния *бетона* и активизируется с увеличением пористости *материала* и степени его повреждения (см. табл. 2). При повышении концентрации агрессивного газа значительно возрастает скорость разрушения: образцы, находящиеся в среде №5, полностью разрушились через 19 месяцев, в то время как в среде №4 – через 31месяц.

Действие SO_2 на бетон и арматуру значительно отличается от действия HCl: в течение первых 9 месяцев испытания идет непрерывное повышение динамического модуля упругости и только к 10-му месяцу наступает некоторое снижение. Как и в случае с хлористым водородом, увеличение концентрации SO_2 приводит к увеличению глубины диффузии газа и усилению коррозионного процесса; следует отметить, что при одинаковой концентрации HCl и SO_2 более агрессивное воздействие оказывает кислота.

Как показывает анализ вышеприведенного исследования, именно действие хлоридов на железобетон наиболее агрессивно, поэтому рассмотрим следующий опыт [6]. В качестве агрессивной среды был принят 1 %-й раствор соляной кислоты HCl, показатель pH=0,56, концентрация ионов хлора 10,09 г/л; изготовлено 4 образца для оценки влияния разных видов окружающей среды:

- всестороннее воздействие раствора соляной кислоты;
- воздействие раствора соляной кислоты со стороны растянутой и сжатой зон сечения;
- воздействие раствора соляной кислоты только на сжатую часть сечения;
- нормальные температурно-влажностные условия.

Образцы в агрессивный раствор погружались полностью, концентрация соляной кислоты поддерживалась неизменной и постоянно контролировалась. Через 28 суток (затем через 180, 360, 540 и 720) проводилась оценка прочностных показателей.

Результаты испытаний бетонных кубов и призм показали, что при длительном воздействии жидкой хлоридсодержащей среды вследствие диффузии агрессивных реагентов происходит изменение свойств основного материала. Средние опытные значения для каждого временного этапа воздействия хлоридсодержащей среды приведены в табл. 3

Таблица 3

Изменение свойств бетона в 1 %-м растворе HCl

Среда	Время, суток	Кубиковая прочность бетона R, МПа	Призменная прочность бетона R_b, МПА	Модуль упругости бетона E_b, МПА	Глубина проникания хлоридов в бетон $L_{хл}$, см
Воздух	28	40,2	33,4	35500	0,00
1 % раствор HCl	180	42,4	35,7	34100	0,90
	360	37,3	32,4	31900	1,40
	540	34,2	30,7	30600	1,85
	720	33,6	29,5	28200	2,30

Нами рассмотрено действие NaCl на 5 различных составов цементно-песчаных композитов при двух значениях подвижности растворной смеси (125–130 и 150–160 мм соответственно), определяемой расплывом на встряхивающемся столике [6]. После предварительного твердения в течение 28 суток во влажной среде образцы испытывали при следующих условиях: сначала погружали на сутки одну серию в воду, вторую – в 10 %-й раствор поваренной соли; затем вынимали из раствора и сушили в течение суток при температуре +40°С, обдувая воздухом. Периодически взвешивали, а после 100, 200 и 400 циклов попеременного увлажнения / высушивания (тепловлажностной обработки (ТВО)) испытывали на прочность при сжатии и изгибе.

По результатам испытаний установлено, что после 100 циклов ТВО прочность образцов практически не изменилась; после 200 и особенно 400 циклов наблюдается значительное снижение показателей прочности. Полученные данные позволяют сделать вывод о влиянии агрессивных воздействий: в частности, многократное насыщение в растворах NaCl и высушивание образцов приводят к более интенсивному разрушению последних, чем такое же испытание в воде. Снижение прочности цементного камня после 400 циклов увлажнения и высушивания достигает 30 % (табл. 4).

Таблица 4

Изменение прочности на сжатие образцов после ТВО (в течение одного года)

Состав раствора	Относительная прочность на сжатие, %, после … циклов ТВО			
	в воде, после		в 10 % растворе NaCl, после	
	200	400	200	400
Средний состав	97,3	89,0	79,2	71,3
Состав на цементе «грубого помола»	-	-	-	73,5
Составы на цементах «тонкого помола»:				
среднее	–	–	–	69
1:2	–	–	–	75
1:2,5	–	–	–	73
1:3	–	–	–	63,1

Таким образом, на основе анализа научно-теоретических данных и результатов выполненных авторами натурных исследований [1…7] установлено существенное влияние хлоридной коррозии на механические и эксплуатационные свойства конструкционного материала транспортных сооружений.

Заключение

Проанализированы и изучены физические и механические основы явлений коррозии железобетонных элементов мостов.

Выполненные исследования лабораторно-экспериментальных образцов и анализ опыта эксплуатации реальных сооружений позволили сделать оценку физико-хими-

ческих процессов и явлений взаимодействия окружающей / эксплуатационной среды на технологические характеристики железобетонных элементов.

Установлены зависимости прочностных характеристик от концентрации агрессивных элементов в воздухе атмосферы, изменения температуры и влажности, а также от технологических характеристик бетона и арматуры, климатических и географических условий расположения сооружения.

Показана необходимость изучения процесса влияния агрессивных сред на железобетонные элементы транспортных сооружений с целью разработки пассивных и активных способов защиты и повышения долговечности транспортных сооружений на автомобильных дорогах.

Список литературы

1. Долговечность железобетона в агрессивных средах: Совм. Изд. СССР-ЧССР-ФРГ/ С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шиссль. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.: ил. – ISBN 5-274-00923-9

2. Овчинникова, Т.С. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций / Т.С. Овчинникова, А.Н. Маринин, И.Г. Овчинников // Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – № 5(24). – С. 11. – EDN TKELFZ.

3. Васильев, А.А. Оценка карбонизации и развития ее параметров во времени по сечению бетонов для различных эксплуатационных условий / А.А. Васильев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2021. – № 8. – С. 43–52. – EDN KUXFDI.

4. Содержание углекислого газа в толще атмосферы центральной части Евразии (станция мониторинга «ИССЫК-КУЛЬ») / Ф.В. Кашин, В.Н. Арефьев, Н.Е. Каменоградский [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43, № 4. – С. 521–530. – EDN IANKXZ.

5. Маринин, А.Н. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом хлоридной коррозии и карбонизации: дис. канд. тех. наук: 05.11.23 / А.Н. Маринин. – Вологорад, 2007. – 383 с.

6. Раткин, В.В. Разрушительное действие хлоридсодержащей среды на примере обследования железобетонного моста в Новгородской области / В.В. Раткин, В.К. Черных, А.А. Тарасов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2015. – № 1 (9). – URL: trts.esrae.ru/15-62.

7. Тарасеева, Н.И. Физико-химические процессы и основы разрушения транспортных сооружений на автомобильных дорогах / Н.И. Тарасеева, А.С. Крылов, Д.А. Кузнецов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 82–88.

References

1. Durability of reinforced concrete in aggressive environments: Sovm. Ed. USSR-Czechoslovakia-Germany / S.N. Alekseev, F.M. Ivanov, S. Modry, P. Schiessl. – M.: Stroyizdat, 1990. – 320 p.: ill. – ISBN 5-274-00923-9

2. Ovchinnikova, T.S. Corrosion and anti-corrosion protection of reinforced concrete bridge structures / T.S. Ovchinnikova, A.N. Marinin, I.G. Ovchinnikov // Internet Journal of Science. – 2014. – No. 5(24). – P. 11. – EDN TKELFZ.

3. Vasiliev, A.A. Assessment of carbonization and the development of its parameters over time along the cross-section of concrete for various operating conditions / A.A. Vasiliev // Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Science. – 2021. – No. 8. – P. 43–52. – EDN KUXFDI.

4. Content of carbon dioxide in the atmosphere of the central part of Eurasia (monitoring station «ISSYK-KUL») / F.V. Kashin, V.N. Arefiev, N.E. Kamenogradsky [etc.] // News of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean. – 2007. – Vol. 43, No. 4. – P. 521–530. – EDN IANKXZ

5. Marinin, A.N. Forecasting the stress-strain state of reinforced concrete structures of transport structures, considering chloride corrosion and carbonation: dis. ... candidate of Sciences: 05.11.23 / A.N. Marinin. – Volgograd, 2007. – 383 p.

6. Ratkin, V.V. Destructive effect of a chloride-containing environment on the example of an inspection of a reinforced concrete bridge in the Novgorod region / V.V. Ratkin, V.K. Chernykh, A.A. Tarasov // Technical regulation in transport construction. – 2015. – No. 1 (9). – URL: trts.esrae.ru/15-62.

7. Taraseeva, N.I. Physico-chemical processes and fundamentals of destruction of transport structures on highways / N.I. Taraseeva, A.S. Krylov, D.A. Kuznetsov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P. 82–88.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.16

DOI 10.54734/20722958_2024_3_128

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

Гришин Борис Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: bgrishin@rambler.ru

Бикунова Марина Викторовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

Салмин Сергей Михайлович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: sam-14@yandex.ru

Янюшкин Данила Александрович,
аспирант кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: voda@pguas.ru

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

Grishin Boris Mikhailovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the Department «Water Supply, Sewerage and Hydraulic Engineering»
E-mail: bgrishin@rambler.ru.

Bikunova Marina Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Water Supply, Sewerage and Hydraulic Engineering»
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

Salmin Sergey Mikhailovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Water Supply, Sewerage and Hydraulic Engineering»
E-mail: sam-14@yandex.ru

Yanyushkin Danila Aleksandrovich,
Postgraduate student of the Department «Water Supply, Sewerage and Hydraulic Engineering»
E-mail: voda@pguas.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ ПРИМЕСЕЙ ВОДЫ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ДИСПЕРСНОСТИ

Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, С.М. Салмин, Д.А. Янюшкин

Сделан анализ теоретических зависимостей для определения скорости коагуляции примесей воды с различной степенью дисперсности в условиях броуновского движения и турбулентного перемешивания. Показано влияние степени полидисперсности водной системы на интенсивность образования агломератов в процессе коагуляции. Исследована кинетика процесса коагуляции тонкодисперсных примесей речной воды в присутствии крупных частиц предварительно обработанных коагулянтом промывных вод фильтров, используемых в качестве замутнителя. Установлены факторы, оказывающие определяющее влияние на увеличение скорости коагуляции примесей речной воды в смеси с промывными водами фильтров. Даны рекомендации по использованию полученных теоретических зависимостей в практике водоподготовки.

Ключевые слова: природная вода, промывные воды фильтров, примеси, степень дисперсности, скорость коагуляции

THEORETICAL STUDIES OF COAGULATION PROCESS OF WATER IMPURITIES WITH DIFFERENT DISPERSITY

B.M. Grishin, M.V. Bikunova, S.M. Salmin, D.A. Yanyushkin

The analysis of theoretical dependences of determining the coagulation rate of water impurities with different degree of dispersion in conditions of Brownian motion and turbulent mixing is carried out. The influence of polydispersity degree of water system on the intensity of agglomerate formation during coagulation is shown. The coagulation process kinetics of fine river water impurities in the presence of large particles of pretreated by coagulant filter wash water used as a turbidifier has been studied. The factors that have a decisive influence on the increase on the coagulation rate of river water impurities in a mixture with filter wash water have been established. Recommendations on the use of the obtained theoretical dependencies in water treatment practice are given.

Keywords: natural water, filter wash water, impurities, degree of dispersion, coagulation rate

Эффективность процесса коагуляции примесей природной воды в значительной мере зависит от дисперсного состава частиц.

В условиях броуновского движения для полидисперсной водной системы с частицами примесей, заметно различающимися по своим размерам, константа скорости коагуляции может быть определена по формуле, предложенной Г. Мюллером:

$$K = \left[4 + \left(\sqrt{r_1 / r_2} - \sqrt{r_2 / r_1}\right)^2\right] DR, \quad (1)$$

где r_1 и r_2 – соответственно радиусы крупных и мелких частиц; D – коэффициент броуновской диффузии одиночных частиц; R – радиус коагуляции, т.е. расстояние, на которое должны приблизиться центры частиц друг к другу, чтобы произошло их объединение.

Изменение числа частиц в процессе коагуляции, по Г. Кройту,

$$N_\tau + n_\tau = \frac{N_0}{1 + \tau / T}\left[1 + \frac{\Phi}{\left(\Phi K_n + 1\right)\left(1 + \tau / T\right)^{\Phi} - 1}\right], \quad (2)$$

где n_τ – число мелких частиц и агломератов, образуемых только мелкими частицами в единице объёма за время τ; N_τ –число крупных частиц и агломератов, образующихся в единице объема за время τ; T – время, в течение которого количество частиц в единице объёма коллоидной системы уменьшается вдвое; Ф – фактор Мюллера, определяющий степень дисперсности примесей,

$$\Phi = \left(K_r^2 + 1\right) / 2K_r; \quad (3)$$

здесь $K_r = r_1 / r_2$.

Коэффициент K_n в формуле (2) характеризует отношение количества крупных (N_0) и мелких (n_0) частиц примесей в коллоидной системе в начальный момент времени.

При значениях K_r и K_n более 10 результаты, полученные по формуле (2), существенно отличаются от результатов, полученных по формуле для мелкодисперсной системы.

$$n_\tau = \frac{n_0}{1 + K_0 \cdot n_0 \cdot \tau}, \quad (4)$$

где K_0 – константа скорости коагуляции мелких частиц, $K_0 = 4\pi DR$.

Как было показано Н.А. Фуксом, константа скорости коагуляции K в условиях броуновского движения для частиц с радиусом $r_1 = 10^{-4}$ мм и $r_2 = 10^{-6}$ мм превышает величину K для частиц с $r_1 = r_2 = 10^{-4}$ мм приблизительно в 10^3 раз, а константа скорости коагуляции для частиц с радиусом $r_1 = 10^{-2}$ мм и $r_2 = 10^{-6}$ мм превышает значение K для частиц с $r_1 = r_2 = 10^{-6}$ мм в $1{,}8 \cdot 10^5$ раз.

Степень полидисперсности системы играет весьма значительную роль и при турбулентном перемешивании. Турбулентный режим движения не только приводит к увеличению числа столкновений между частицами, но и ускоряет процесс разрушения образующихся агломератов [1]. В работах Б.В. Дерягина скорости образования двоичных мелких частиц и образования агрегатов из крупных и мелких частиц были представлены в виде:

$$dn_{m1} = K_1 n_m^2 - K_2 n_{m1}, \tag{5}$$

$$dn_{k1} = K_3 n_k n_m - K_4 n_{k1}, \tag{6}$$

где n_m и n_k – соответственно количество мелких и крупных частиц; n_{m1} – число двоичных мелких частиц; n_{k1} – число агрегатов из мелких и крупных частиц; K_1 и K_3 – константы скоростей образования соответственно двоичных мелких частиц и агрегатов из крупных и мелких частиц; K_2 и K_4 – константы скоростей разрушения соответственно двоичных мелких частиц и агрегатов из крупных и мелких частиц.

Для оценочных расчётов скоростей образования двоичных частиц и агрегатов Б.В. Дерягиным были использованы константы $K_{ф1}$ и $K_{ф3}$:

$$K_{ф1} = \mathrm{K}_1 / a, \; K_{ф3} = \mathrm{K}_3 / a, \tag{7}$$

где a – расчётный коэффициент, учитывающий плотность и дисперсность суспензии.

Пренебрегая скоростью разрушения двоичных частиц и агрегатов в первые моменты турбулентного перемешивания, Б.В. Дерягин, В.Д. Самыгин и А.К. Лившиц получили зависимости констант $K_{ф1}$ и $K_{ф2}$ от pH среды для суспензии галенита, содержащей 80-85 % частиц мелкой фракции и 15-20 % крупной фракции. Анализ зависимостей позволил сделать вывод о том, что скорость налипания мелких частиц на крупные в суспензии галенита примерно в 400 раз выше, чем скорость коагуляции мелких частиц между собой. Характер изменения константы $K_{ф3}$ во всём диапазоне pH (от 3 до 9) аналогичен характеру изменения константы $K_{ф1}$, т.е. соотношение $K_{ф3}/ K_{ф1}$ не зависит от физико-химических свойств диспергированной среды. В.Д. Самыгин, рассматривая процесс смешения мелких и крупных частиц для начальных моментов времени перемешивания в условиях турбулентного движения, использовал следующие уравнения:

$$\frac{dn_{m1}}{dt} = -2K_1 n_m, \tag{8}$$

$$\frac{dn_{k1}}{dt} = -2K_1 n_m^2 - 2K_3 n_m n_k. \tag{9}$$

По В.Г. Левичу, в условиях турбулентного перемешивания диффузный (броуновский) механизм встречи (слипания) частиц преобладает, если размер частиц меньше внутреннего масштаба турбулентности ($d<\lambda_0$), а инерционный механизм характерен для крупных частиц с размерами $d>\lambda_0$ и относительно большой массой. Соотношение обоих механизмов В.Г. Левич оценивал по формуле

$$\frac{K_i}{K_d} \approx \frac{\rho(d/2)}{\rho_0 \cdot \lambda_0}, \tag{10}$$

где K_i и K_d – полное число встреч в единице объёма в единицу времени соответственно по инерционному и диффузионному механизмам; d – средний диаметр частиц; ρ и ρ_0 – плотности частиц соответственно примесей и жидкости.

Принимая $K_1 = K_i$ и $K_3 = K_d$, Самыгин В.Д. для мелких частиц минеральных примесей с d = 7-11 мкм и крупных частиц с d = 60 мкм расчётным путём определил, что соотношение K_3/K_1 может варьироваться в пределах от $1{,}2 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$. Таким образом,

по Самыгину В.Д., скорость налипания мелких частиц на крупные может превышать скорость слипания мелких частиц между собой в 10^3-10^4 раз, однако при большой разнице в размерах увеличится вероятность обтекания мелкими частицами крупных и число слипаний резко снизится.

Указанные соотношения K_3/K_1 были получены для гидрофобных частиц различных минералов – фосфорита, апатита, кальцита и кварца.

В работе [2] было высказано предположение, что коагуляцию тонкодисперсных примесей сырой речной воды можно значительно интенсифицировать, добавляя в неё замутнитель (например промывные воды фильтров) с большим количеством крупных агломератов частиц, образованных за счёт предварительной коагуляционной обработки замутнителя. Наиболее экономически целесообразной является предварительная обработка промывных вод фильтров (ПВФ) органическими коагулянтами с последующей обработкой смеси ПВФ с речной водой минеральным коагулянтом и дальнейшей её очисткой.

Рассмотрим уравнение кинетики коагуляции примесей воды поверхностного источника в присутствии замутнителя. По Г. Хадсону, скорость «исчезновения» мелких частиц за счёт их налипания на крупные в процессе коагуляции может быть представлена выражением

$$-\frac{dn_m}{dt} = \frac{1}{6}\psi \cdot n_m \cdot n_k \cdot G \cdot d_k^3, \tag{11}$$

где d_k – средний диаметр крупных частиц; ψ – коэффициент эффективности соударений частиц; G – градиент скорости перемешивания речной воды с замутнителем в присутствии минерального коагулянта.

В формуле (11) под величиной d_k будет подразумеваться средний диаметр частиц взвеси в ПВФ после обработки последних органическим коагулянтом.

Если крупные частицы будут присутствовать в замутнителе, предварительно обработанном органическим коагулянтом, то их количество в соответствии с расчётами Ю.И. Вейцера будет равно:

$$n_k = \frac{n_{\text{ор}}}{\left(1 + F \cdot G_{\text{р}} \cdot c_{\text{р}} \cdot t_{\text{р}}\right)}, \tag{12}$$

где $c_{\text{р}}$ – объёмная концентрация дисперсной фазы в замутнителе (промывной воде фильтров); $n_{\text{ор}}$ и n_k – количество частиц дисперсной фазы замутнителя соответственно до и после предварительной коагуляционной обработки; $G_{\text{р}}$ и $t_{\text{р}}$ – градиент скорости и время перемешивания замутнителя с органическим коагулянтом; F – параметр, определяющий физико-химические свойства органического коагулянта,

$$F = \varphi \cdot \chi \cdot \theta\left(1 - \theta\right); \tag{13}$$

здесь φ – коэффициент, учитывающий действие возникающих между молекулами коагулянта и частицами примесей сил Кулона и Ван-дер-Ваальса; χ – коэффициент, учитывающий длину полимерных «мостиков» между двумя частицами; θ – доля поверхности частицы, занятая адсорбированными молекулами полимера.

Подставив значение n_k из (12) в (11), получим:

$$-\frac{dn_m}{dt} = \frac{1}{6}\psi \cdot \frac{n_m n_{\text{ор}} \cdot G \cdot d_k^3}{\left(1 + F \cdot \mathrm{G}_{\text{р}} \cdot c_{\text{р}} \cdot t_{\text{р}}\right)}. \tag{14}$$

Выразим $n_{\text{ор}}$ через объёмную концентрацию взвеси в единичном объёме промывной воды и объём одной частицы:

$$n_{\text{ор}} = \frac{c_{\text{р}} \cdot 6}{\pi d_{\text{ор}}^3}, \tag{15}$$

где $d_{\text{ор}}$ – средний диаметр частиц примесей промывной воды до обработки органическим коагулянтом.

Из (14), выражая n_m через концентрацию взвеси в единичном объёме исходной речной воды c_0, получим выражение для скорости коагуляции примесей воды поверхностного источника в присутствии замутнителя (ПВФ):

$$u_m = -\frac{dn_m}{dt} = \frac{\psi \cdot c_0 \cdot c_{\text{р}} \cdot G}{\pi^2 \left(1 + F \cdot \text{G}_{\text{р}} \cdot c_{\text{р}} \cdot t_{\text{р}}\right)} \cdot \frac{d_k^3}{d_{\text{ор}}^3} \cdot \frac{V_p \cdot \left(1 - V_p\right)}{d_m^3}, \quad (16)$$

где d_m – средний диаметр примесей речной воды; V_p – объём промывной воды фильтров в единице объёма её смеси с речной водой.

Таким образом, при фиксированных значениях концентраций c_0 и $c_{\text{р}}$ скорость коагуляции примесей речной воды в присутствии крупных частиц ПВФ будет являться функцией произведения:

$$u_m = f\left(\frac{G}{G_{\text{р}} \cdot t}\right)\left(\frac{d_k^3}{d_{\text{ор}}^3 \cdot d_m^3}\right) \cdot V_p \cdot \left(1 - V_p\right). \quad (17)$$

Как видно из формул (16) и (17), интенсивность и время перемешивания, величина соотношения $\left(\frac{d_k^3}{d_{\text{ор}}^3 \cdot d_m^3}\right)$, а также соотношение объёмов ПВФ и речной воды будут оказывать существенное влияние на скорость образования агрегатов взвешенных частиц в смеси речной воды и ПВФ. На выбор режимов перемешивания, в свою очередь, будут влиять такие факторы, как щелочность, pH, температура природной воды и наличие в ней органических и неорганических примесей [3, 4], а также дозы и типы коагулянтов, которыми будут обрабатываться ПВФ и смесь ПВФ с речной водой. Поэтому для обеспечения максимальной скорости коагуляции взвеси в получаемой смеси воды поверхностного источника и ПВФ параметры, входящие в формулы (16) и (17), должны постоянно корректироваться экспериментальным путём на станции водоподготовки в различные периоды года.

ВЫВОДЫ

1. В условиях броуновского движения, а также при турбулентном перемешивании в водных полидисперсных системах скорость налипания мелких частиц на крупные может превышать скорость слипания мелких частиц между собой в 10^3-10^5 раз.

2. Теоретическим путём доказано, что скорость коагуляции мелких частиц примесей речной воды в присутствии крупных частиц промывных вод фильтров, предварительно обработанных органическим коагулянтом, зависит от условий перемешивания промывных вод и речной воды с коагулянтами различных типов, а также степени укрупнения частиц замутнителя перед смешением с речной водой.

3. Корректировка параметров, влияющих на эффективность процесса коагуляции примесей речной воды, должна осуществляться на водоочистной станции в постоянном режиме, прежде всего в характерные периоды года (весенне-летний, осенне-зимний, паводок).

Список литературы

1. Marchisio, D.L. Role of turbulent shear rate distribution in aggregation and breakage processes / D.L. Marchisio, M.Soos, J. Sefcik, M. Morbidelli // AICHEJ. – 2006. – № 52. – P.158–173.

2. Гришин, Б.М. Варианты повторного использования промывных вод станций водоподготовки / Б.М. Гришин, А.Н. Кошев, М.В. Бикунова, Д.А. Янюшкин // Инженерный вестник Дона. – 2023. – №12.

3. Danny, P.W.S. Assessment and Optimization of Coagualation Process in Water Treatment Plant: A Review / P.W.S. Danny, R.B. Muhammad, S. Norazanita // ASEAN Journal of Science and Engineering. –2023. –№3(1). – P. 79–100.

4. Gui, H. Application progress of enhanced coagulation in water treatment / H. Gui, X. Huang, Z. Yu, P. Chen, X. Cao //RSC Advances. –2020. –№10(34). – P. 20231–20244.

References

1. Marchisio, D.L. Role of turbulent shear rate distribution in aggregation and breakage processes / D.L. Marchisio, M.Soos, J. Sefcik, M. Morbidelli // AICHEJ. – 2006. – № 52. – P.158–173.

2. Grishin, B.M. Options for reusing wash water from water treatment stations / B.M. Grishin, A.N. Koshev, M.V. Bikunova, D.A. Yanyushkin // Engineering Bulletin of the Don. – 2023. – No. 12.

3. Danny, P.W.S. Assessment and Optimization of Coagualation Process in Water Treatment Plant: A Review / P.W.S. Danny, R.B. Muhammad, S. Norazanita // ASEAN Journal of Science and Engineering. – 2023. – №3(1). – P. 79–100.

4. Gui, H. Application progress of enhanced coagulation in water treatment / H. Gui, X. Huang, Z. Yu, P. Chen, X. Cao //RSC Advances. – 2020. – №10(34). – P. 20231–20244.

УДК 628.3 DOI 10.54734/20722958_2024_3_134

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

Глебова Татьяна Александровна,
доцент кафедры «Информационно-вычислительные системы»
E-mail: tan.1952@mail.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Лебединский Константин Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортные машины»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие "Рубин"»
Россия, 440000, Пенза, Байдукова, 2,
тел.: +7-8412-20-48-08

Князев Владимир Александрович,
кандидат технических наук,
инженер 1-й категории

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

Glebova Tatyana Aleksandrovna,
Associate Professor of the Department «Information and Computing Systems»
E-mail: tan.1952@mail.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Transport Machines»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

Joint Stock Company Research And Production Enterprise Rubin
Russia, 440000, Penza, 2, Baidukova,
tel: + 7-8412-20-48-08

Knyazev Vladimir Aleksandrovich,
Candidate of Sciences,
1st Category Engineer

ВИХРЕВОЙ САТУРАТОР

С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.А. Князев, Т.А.Глебова

На основе теоретических и лабораторных исследований процессов напорной и вакуумной флотации разработана новая конструкция вихревого сатуратора. Показано, что на основе принципа вращательно-поступательного движения нисходяще-восходящего потока водовоздушной смеси можно последовательно реализовывать процессы насыщения воды воздухом при повышении давления и выделения мелкодисперсных пузырьков воздуха из перенасыщенного раствора при пониженном давлении.

Использование эффекта вихревой сатурации делает возможным совмещение в одном устройстве преимуществ процессов компрессионной и вакуумной флотации.

Ключевые слова: компрессионная флотация, вакуумная флотация, сатуратор, перенасыщенный раствор, зародышевый пузырек, водовоздушная смесь, флотационный объем

A VORTEX SATURATOR

S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, V.A. Knyazev, T.A. Glebova

A new design of a vortex saturator is developed on the basis of theoretical and laboratory research of pressure and vacuum flotation processes. It is shown that implementation of the principle of rotational-translational motion of the downward-upward flow of a water-air mixture makes it possible to consistently implement the processes of saturation of water with air with increasing pressure and release of finely dispersed air bubbles from an oversaturated solution at reduced pressure.

The use of the vortex saturation effect makes it possible to combine the advantages of compression and vacuum flotation processes in one device.

Keywords: compression flotation, vacuum flotation, saturator, supersaturated solution, germ bubble, water-air mixture, flotation volume

В настоящее время широкое распространение получил метод флотационного удаления мелкодисперсных загрязнений из сточных вод, отводимых с территории населенных пунктов и промышленных предприятий [1]. В процессе флотационной очистки сточных вод последовательно протекают стадии: образования флотокомплексов «пузырек воздуха – частица загрязнения», формирующихся в результате молекулярного прилипания дисперсной частицы к поверхности раздела фаз «жидкость – газ», всплывания флотокомплексов на поверхность жидкости и образования пенного слоя, удаления пенного слоя с поверхности жидкости [2].

Процесс выделения из сточных вод дисперсных частиц загрязнений при флотационной очистке протекает значительно быстрее, чем процесс осветления сточных вод при гравитационном отстаивании, поскольку скорость флотационного отделения дисперсных частиц мало зависит от седиментационных свойств отделяемых частиц и определяется величиной гидравлической крупности образовавшихся флотокомплексов.

Флотационные установки по способу получения водовоздушной смеси во флотационном объеме подразделяются на две основные группы:

1) флотационные установки, в которых водовоздушная смесь образуется в результате подачи воздуха во флотационный объем и его дробления (диспергирования);

2) флотационные установки, в которых мелкодисперсные пузырьки воздуха формируются в результате их выделения из перенасыщенного раствора.

Метод получения водовоздушной смеси при выделении воздуха из перенасыщенного раствора позволяет сформировать самые мелкие пузырьки, что обеспечивает высокую эффективность процесса флотационной очистки.

Максимальное количество газа, которое может быть растворено в единице объема жидкости (концентрация насыщения жидкости газом), пропорционально его парциальному давлению в газовой смеси над раствором.

В соответствии с законом Генри, концентрация насыщения жидкости газом может быть определена по формуле

$$C_{\text{нр}} = C_{\text{н}_0} \frac{P}{P_0},\ \text{кг/м}^3, \qquad (1)$$

где $C_{\text{нр}}$, кг/м^3, – концентрация насыщения жидкости газом при давлении газовой смеси над раствором P, Па; $C_{\text{н}_0}$, кг/м^3, – концентрация насыщения жидкости газом при атмосферном давлении газовой смеси над раствором $P_0 = 10^5$ Па.

Растворимость воздуха в воде зависит от давления P, Па, и температуры t, ℃.

Данные по растворимости воздуха в воде $C_{\text{н}_0}$, кг/м^3, при атмосферном давлении $P_0 = 10^5$ Па в зависимости от величины температуры t, ℃, представлены в форме таблицы.

Температура, t, ℃	Максимальная концентрация (растворимость) воздуха в воде, $C_{\text{н}_0} \cdot 10^{-3}$, кг/м^3	Температура, t, ℃	Максимальная концентрация (растворимость) воздуха в воде, $C_{\text{н}_0} \cdot 10^{-3}$, кг/м^3
10	29,2	40	17,0
20	23,6	50	14,7
30	19,9	60	12,7

Процесс выделения газа из перенасыщенного раствора жидкости может быть описан в соответствии с теоретическими представлениями, разработанными Д. Гиббсом.

В теории Д. Гиббса были сформулированы следующие основные допущения:

1) устойчивой считается изолированная система, в которой при любом малом изменении ее состояния при постоянстве энергии величина энтропии остается постоянной или уменьшается;

2) относительно устойчивой (метастабильной) считается изолированная система, в которой при любом малом изменении ее состояния при постоянстве энергии величина энтропии возрастает.

Перевести раствор воздуха в воде с концентрацией $C_{\text{нр}}$, кг/м^3, полученной при давлении P, Па, в метастабильное состояние можно путем понижения давления до значения $P_0 = 10^5$ Па, в результате чего раствор воздуха в воде становится перенасыщенным (концентрация воздуха в растворе C превышает величину концентрации насыщения $C_{\text{н}_0}$).

В соответствии с законом Лапласса, из перенасыщенного раствора воздуха в воде могут выделяться зародыши пузырьков воздуха, имеющие минимальный размер (радиус) $R_{\text{п.кр}}$, м:

$$R_{\text{п.кр}} = \frac{2\sigma_{\text{ж.г.}}}{\Delta P}, \tag{2}$$

где $\sigma_{\text{ж.г.}}$, н/м, – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела фаз «вода – воздух»; ΔP, Па, – разница давлений воздуха над водой до P и после P_0 сброса давления,

$$\Delta P = P - P_0, \text{Па}. \tag{3}$$

В соответствии с формулой (2) величина критического радиуса зародышевого пузырька при перепаде давлений $\Delta P = 10^5 - 10^6$ Па и значении коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{\text{ж.г.}} = 0,07$ н/м;Дж/м^2 составит $R_{\text{п.кр}} = 10^{-6} - 10^{-7}$ м. Зародышевые пузырьки воздуха, имеющие такой масштаб, будут содержать $10^5 - 10^8$ молекул воздуха.

Условием выделения зародышей пузырьков воздуха, имеющих критический размер (радиус) $R_{\text{п.кр}}$, которые образуют новую фазу из раствора воздуха в воде является не только превышение величины химического потенциала выделяющегося вещества в старой фазе над его химическим потенциалом в новой фазе, но и преодоление энергетического барьера, обусловленного поверхностной энергией, образующейся на границе раздела фаз «вода – воздух».

Процесс выделения зародышевых пузырьков воздуха из перенасыщенного раствора (образование новой фазы), несмотря на наличие перенасыщения, затруднен из-за энергетического барьера. Новая фаза образуется только в процессе спонтанной локальной флуктуации концентрации растворенного газа в некотором объеме раствора, в результате чего происходит скопление достаточно большого числа молекул новой фазы. Выделение зародышевых пузырьков воздуха из перенасыщенного раствора существенно интенсифицируется при наличии в растворе микровключений, выступающих в роли центров образования, аналогичных центрам конденсации или кристаллизации. Выделившиеся из перенасыщенного раствора зародышевые пузырьки воздуха начинают быстро расти за счет процесса диффузии в них растворенного воздуха до момента, при котором перенасыщение исчезает.

Осуществить выделение из перенасыщенного раствора пузырьков воздуха можно при проведении двух технологических процессов:

1) в процессе напорной (компрессионной) флотации;
2) в процессе вакуумной флотации.

Наибольшее распространение в практике очистки сточных вод получили флотационные установки, реализующие принцип напорной флотации.

Насыщение очищаемых сточных вод воздухом в процессе напорной флотации производится под избыточным давлением 0,3 – 0,5 МПа в напорном баке – сатураторе. Сжатый воздух подается в сатуратор компрессором. Как правило, объем сатуратора рассчитывается на необходимую продолжительность процесса насыщения очищаемых сточных вод воздухом в течение 1-3 минут. Насыщенные воздухом под избыточным давлением сточные воды поступают во флотационный резервуар (флотатор) через специальное устройство – дроссель, в котором происходит сброс давления, в результате чего раствор воздуха становится перенасыщенным и из него выделяются пузырьки воздуха.

Объем флотационного резервуара может быть разделен на флотационную и отстойную камеры. Во флотационной камере происходит образование флотокомплексов «частица загрязнения – пузырек воздуха». В отстойной камере осуществляются отделение из очищаемых сточных вод образовавшихся флотокомплексов и удаление пенного слоя.

Эффективность процесса напорной флотации во многом определяется эффективностью работы сатуратора.

Процесс выделения пузырьков воздуха из перенасыщенного раствора после сброса давления в дросселе протекает в две стадии:

1-я стадия – возникновение зародышей пузырьков воздуха;

2-я стадия – рост образовавшихся зародышей пузырьков воздуха за счет молекулярной диффузии в них воздуха из перенасыщенного раствора.

Процесс образования зародыша пузырька воздуха существенно затруднен, поскольку он требует увеличения энергии Гиббса. Рост образовавшихся пузырьков воздуха протекает самопроизвольно и сопровождается значительным убыванием энергии Гиббса. Поскольку первая стадия процесса выделения пузырьков воздуха из перенасыщенного раствора затруднена, число образующихся в объеме жидкости зародышевых пузырьков с ростом величины перенасыщения раствора воздухом возрастает незначительно, и величина диаметра сформировавшихся из перенасыщенного раствора пузырьков воздуха имеет тенденцию к увеличению.

На рис. 1 представлены графики, полученные В.Н. Покровским, распределения размеров пузырьков азота в воде, образующихся из растворов с различной степенью перенасыщения.

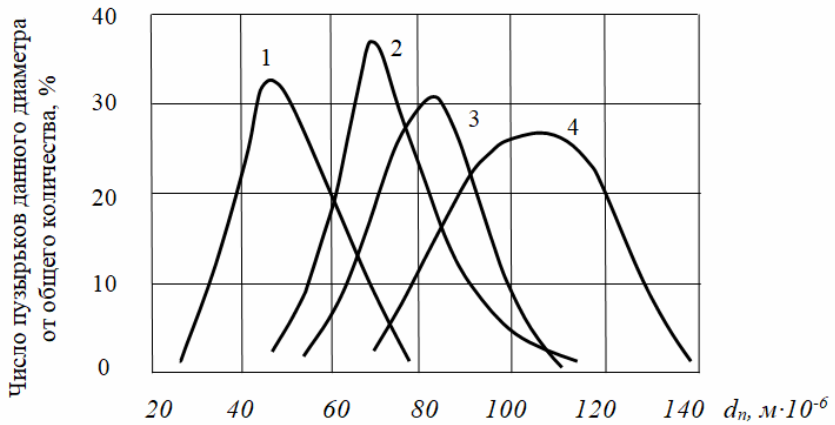


Рис. 1. Графики распределения размеров пузырьков азота в воде, образующихся из растворов при различной степени перенасыщения раствора: 1 – перенасыщение 200 %; 2 – перенасыщение 400 %; 3 – перенасыщение 500 %; 4 – перенасыщение 800 %

Графики (см. рис. 1) показывают, что при всех значениях перенасыщения раствора азотом распределение размеров образующихся пузырьков близко к нормальному. Среднестатистические размеры образующихся пузырьков азота с увеличением степени перенасыщения раствора возрастают. При повышении величины перенасыщения раствора наблюдается расширение спектра дисперсности образующихся пузырьков.

Эффективность процесса флотационной очистки зависит как от степени газонаполнения флотационного объема (величины коэффициента газонаполнения φ), так и от значения эквивалентного диаметра образующихся пузырьков воздуха $d_{\text{п}}$, м. Увеличение значения коэффициента газонаполнения флотационного объема φ обусловливает увеличение объемной концентрации газовой фазы, что приводит к росту общей поверхности раздела фаз «вода – воздух» и повышению эффективности процесса флотационной очистки. Увеличение эквивалентного диаметра образующихся пузырьков воздуха $d_{\text{п}}$, м, при повышении степени перенасыщения раствора способствует снижению вероятности образования флотокомплексов и понижению эффективности процесса флотационной очистки.

В диссертационной работе Н.Н. Рулева приводится следующая формула, позволяющая определить величину коэффициента эффективности захвата флотируемой частицы, имеющей диаметр d_r, м, пузырьком воздуха диаметром $d_{\text{п}}$, всплывающим в стоксовском режиме:

$$E_r = \frac{3}{2}\left(\frac{d_r}{d_{\text{п}}}\right)^2. \qquad (4)$$

Величину коэффициента скорости перехода дисперсной частицы из состояния взвешенного вещества в состояние флотокомплекса при этом рекомендуется определять по формуле

$$K_{\text{ф}} = \frac{3}{2}\frac{q_{\text{в}}E}{d_{\text{п}}}, \text{с}^{-1}, \qquad (5)$$

где $q_{\text{в}}$ – расход воздуха, проходящего в единицу времени через единицу площади флотационного объема, м^3/(м^2·с).

Анализ формул (4) и (5) показывает, что при уменьшении значения величины эквивалентного диаметра сформировавшихся в объеме водовоздушной смеси пузырьков воздуха $d_{\text{п}}$ эффективность процесса удаления мелкодисперсных загрязнений из сточных вод значительно повышается.

Процесс вакуумной флотации позволяет получить во флотационном объеме водовоздушную смесь, содержащую пузырьки воздуха, имеющие меньшие размеры, чем пузырьки воздуха, образующиеся при напорной флотации. Удельные энергозатраты на процесс насыщения обрабатываемых воздухом сточных вод при вакуумной флотации также имеют меньшее значение, чем энергозатраты при напорной флотации.

В процессе вакуумной флотации сточные воды насыщаются воздухом при атмосферном давлении в аэрационной камере в течение 1-2 минут. Насыщенные воздухом сточные воды поступают во флотационную камеру, где поддерживается разрежение 0,02-0,03 МПа, в результате чего растворившийся при атмосферном давлении воздух выделяется в виде микропузырьков, которые эффективно захватывают тонкодисперсные загрязнения. Отвод очищенных сточных вод из вакуумной флотационной камеры осуществляется под гидростатическим давлением, обеспечиваемым за счет разности уровней жидкости во флотационной камере и приемном резервуаре. В некоторых случаях для этих целей используются насосы.

Недостатком вакуумных флотаторов является необходимость строительства герметичных флотационных камер и монтажа устройств, поддерживающих на должном

уровне вакуум во флотационных камерах, что создает дополнительные сложности в процессе эксплуатации.

В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства была разработана новая конструкция вихревого сатуратора, позволяющая совмещать основное преимущество процесса напорной флотации (высокое значение коэффициента газонаполнения φ водовоздушной смеси, выделяющейся во флотационном объеме) и процесса вакуумной флотации (малая величина среднестатистического размера образующихся пузырьков воздуха).

На рис. 2 и 3 представлены конструкционная схема и общий вид вихревого сатуратора.

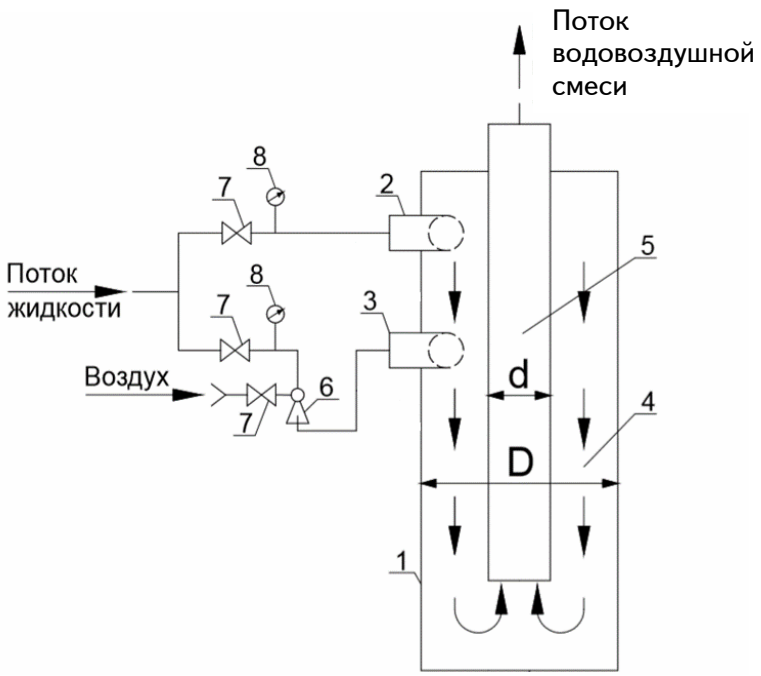


Рис. 2. Конструктивная схема вихревого сатуратора:
1 – корпус вихревого сатуратора; 2 – патрубок ввода потока жидкости; 3 – патрубок ввода водовоздушной смеси; 4 – кольцевая вихревая камера; 5 – вакуумная вихревая камера; 6 – эжектор; 7 – запорная арматура; 8 – манометр

Рис. 3. Общий вид вихревого сатуратора

Вихревой сатуратор работает следующим образом.

Поток, насыщаемый воздухом жидкости под напором, величина которого измеряется манометрами 8, поступает в патрубок ввода потока жидкости 2 и на вход эжектора 6 (водовоздушного гидроструйного насоса). Патрубок ввода 2 тангенциально подсоединен к корпусу вихревого сатуратора 1, что позволяет создать вращательно-поступательное движение жидкости в кольцевой вихревой камере 4.

В результате вращательно-поступательного движения потока жидкости в вихревой камере 4 величина давления в нем становится меньше величины давления на входе в патрубок 2. Под действием перепада давлений жидкости $\Delta P, \text{Па}$, на входе в эжектор 6 и в патрубке ввода водовоздушной смеси 3 эжектор 6 подсасывает атмосферный воздух. Образующаяся при этом водовоздушная смесь поступает через патрубок 3 в кольцевую вихревую камеру 4.

В процессе вращательно-поступательного движения водовоздушной смеси в вихревой камере 4 жидкость насыщается воздухом при повышенном давлении. Дойдя до нижнего глухого торца корпуса вихревого сатуратора 1, нисходящий вращающийся поток водовоздушной смеси меняет направление своего движения. Угловая скорость вращения восходящего потока водовоздушной смеси ω, рад, поступающей в вакуумную вихревую камеру 5, увеличивается прямо пропорционально отношению квадрата диаметра D корпуса вихревого сатуратора 1 и диаметра d вакуумной вихревой камеры 5, в результате чего в вихревой камере 5 создается пониженное давление. Раствор воздуха во вращающемся восходящем потоке водовоздушной смеси становится при пониженном давлении перенасыщенным, и из него выделяются мелкодисперсные пузырьки воздуха.

На рис. 4 представлен общий вид водовоздушной смеси, отобранной из вакуумной вихревой камеры сатуратора.

Рис. 4. Общий вид водовоздушной смеси, отобранной из вакуумной вихревой камеры сатуратора

Новая конструкция вихревого сатуратора за счет реализации принципа вращательно-поступательного движения нисходяще-восходящего потока водовоздушной смеси позволяет последовательно реализовывать процессы насыщения обрабатываемых воздухом сточных вод при повышенном давлении в кольцевой вихревой камере и выделения зародышевых пузырьков воздуха при пониженном давлении в вакуумной вихревой камере.

Образовавшиеся пузырьки при незначительной величине перенасыщения водного раствора воздухом формируют мелкодисперсную водовоздушную смесь.

Использование эффекта вихревой сатурации позволяет совместить в одном устройстве преимущества процессов компрессионной и вакуумной флотации.

Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Интенсификация напорной флотационной очистки сточных вод за счет вторичного введения во флотационный объем крупнодисперсной водо-воздушной смеси / С.Ю. Андреев, С.В. Степанов, В.А. Князев, А.М. Шиляев // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №1 – С. 93–101.

2. Андреев, С.Ю. Теоретическое обоснование интенсификации процесса напорной флотационной очистки сточных вод за счет повышения эффективности растворения воздуха в сатураторе / С.Ю. Андреев, А.И. Шеин, С.В. Степанов, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №4 – С. 160–169.

References

1. Andreev, S.Yu. Intensification of pressure flotation wastewater treatment due to the secondary introduction of a coarse water-air mixture into the flotation volume / S.Yu. Andreev, S.V. Stepanov, V.A. Knyazev, A.M. Shilyaev // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1 – P. 93–101.

2. Andreev, S.Yu. Theoretical substantiation of the intensification of the process of pressure flotation wastewater treatment by increasing the efficiency of air dissolution in a saturator / S.Yu. Andreev, A.I. Shein, S.V. Stepanov, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2021. – No.4 – P. 160–169.

УДК 691 : 519 DOI 10.54734/20722958_2024_3_142

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

Кошев Александр Николаевич,
доктор химических наук,
профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы», действительный член Нью-Йоркской академии наук
E-mail: koshev@pguas.ru

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

Kuzina Valentina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Information and Computing Systems»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Koshev Aleksander Nikolaevich,
Doctor of Chemistry Sciences, Professor of the Department «Information and Computing Systems», Full member of the New York Academy of Sciences
E-mail: koshev@pguas.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

В.В. Кузина, А.Н. Кошев

Рассмотрены вопросы решения задач математического моделирования физико-химических процессов в пористых средах, основанные на теоретических представлениях об электродных, диффузионных, миграционных, адсорбционных процессах и их распределении в псевдогомогенных системах. Построены математические модели и сформулированы краевые условия для расчета распределения физико-химических процессов в объеме рассматриваемой пористой среды при решении задач металлизации углеграфитового материала при создании на его основе композитных и нанокомпозитных материалов, увлажнения волокнистого материала принудительным потоком кондиционированного воздуха, а также задачи поглощения влаги пористыми строительными материалами.

Ключевые слова: пористая среда, углеродные волокнистые материалы, трехмерные проточные электроды, математическое моделирование, процессы увлажнения-влагопоглощения, расчет, оптимизация

MATHEMATICAL MODELING OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES IN POROUS MEDIA

V.V. Kuzina, A.N. Koshev

The problems of mathematical modeling of physicochemical processes in porous media based on theoretical ideas about electrode, diffusion, migration, adsorption processes and their distribution in pseudohomogeneous systems are considered. Mathematical models are constructed and boundary conditions are formulated to calculate the distribution of physical and chemical processes in the volume of porous medium solving the problems of metallization of carbon-graphite material when creating composite and nanocomposite materials on its basis, moistening fibrous material by forced flow of conditioned air, as well as the problem of moisture absorption by porous building materials.

Keywords: porous medium, carbon fibrous materials, three-dimensional flow electrodes, mathematical modeling, humidification-moisture absorption processes, calculation, optimization

Введение

«Пористая среда» (ПС) определяется как некоторый пространственный объем, в котором твердая субстанция, называемая матрицей или твердой фазой, чередуется с пустотами – порами, заполненными жидкой или газообразной фазой физико-химической системы. Основными характеристиками ПС являются: ее геометрические характеристики – регулярность или нерегулярность структуры; пористость – отношение объема пор к общему объему области; реакционная поверхность – площадь твердой фазы в единичном объеме пористой среды. При решении научных и технологических задач, предполагающих исследование процессов в пористых средах, используются как свойства составляющих их пористых материалов, так и механизмы физико-химических гомогенных реакций в объеме и гетерогенных – на поверхности раздела фаз.

В большинстве случаев для решения различных научных, материаловедческих, технологических и инженерных задач требуются экспериментальные исследования макрокинетики процессов и разработка на их основе научных и технологических рекомендаций по использованию процессов в пористых материалах. Однако сложность и трудоемкость системных экспериментальных исследований процессов в ПС определяют необходимость моделирования, в частности математического моделирования физико-химических реакций в пористых материалах. Математическое моделирование позволяет не только выявить и исследовать определяющие физико-химические процессы в порах и на твердой фазе пористой среды, но и решать задачи по оптимизации и оптимальному управлению процессами посредством выбора наиболее благоприятных условий и режимов решения технологических задач.

В качестве примеров физико-химических процессов в пористых средах, имеющих отношение к задачам из области строительных наук, можно назвать, например, задачи создания композиционных и нанокомпозиционных материалов, влагопоглощения в пористых материалах, увлажнения пористых материалов.

Для создания композиционных материалов в различных отраслях промышленности (авиационной, космической, машиностроительной, медицинской, химической и др.) широко применяются углеродные волокнистые материалы (УВМ), представляющие собой объемно-пористую среду с различными технологическими свойствами. Использование УВМ для перечисленных задач связано с осаждением на поверхность составляющих их волокон металлов, сплавов или их соединений. Одним из перспективных методов для этого является электрохимический, позволяющий управлять токовым и гидродинамическим режимами электролиза, составом электролита, конструкционным оформлением электродной системы. При этом решается задача нанесения равномерного осадка металла или покрытия УВМ металлом с определенным профилем по толщине материала. Очевидно, что эффективным решением является использование методов математического моделирования и оптимизации процессов осаждения металлов в проточном трехмерном электроде (ПТЭ) на основе УВМ.

Задачи влагопоглощения и увлажнения пористых материалов возникают при реализации различных технологических процессов в материаловедении, в промышленной и строительной экологии. Как и в предыдущем случае, эффективными методами расчета оптимальных условий физико-химических процессов увлажнения-влагопоглощения являются методы математического моделирования процессов в пористых средах, опирающиеся на физико-химическую теорию пористых сред, современные численные методы и вычислительные технологии.

Задача математического моделирования распределения относительной влажности кондиционированного воздуха в пористой среде, в частности в объеме компактно сформированного текстильного полуфабриката, является актуальной как для разработки теоретических положений, так и для совершенствования технологических процессов влагопоглощения – увлажнения материалов. Значимость решения научных и технологических задач увлажнения – влагопоглощения различных материалов определяется необходимостью улучшения физико-механических свойств увлажняемых волокон, таких, как разрывность, упругость и пр. Как отмечается в литературных

источниках, исследование процессов влагопоглощения-увлажнения, в том числе и методами математического моделирования, способствует развитию теоретических положений и позволяет определять технологические параметры, обеспечивающие наибольшую эффективность процесса [1–5].

Принципы построения математических моделей

При построении математических моделей процессов в ПС в качестве основы моделирования считаем целесообразным использовать идею академика Б.Я. Зельдовича [6], когда пористая среда представляется как псевдогомогенная, в каждом элементарном объеме которой протекает кинетическая реакция, соответствующая определенному физико-химическому процессу. Естественно, кинетические и другие параметры, например, такие, как коэффициент диффузии, токи обмена, константа скорости адсорбции, удельная реакционная поверхность, коэффициент пористости и пр., при таком подходе должны иметь некоторые усредненные значения. При этом, в соответствии с теоретическими представлениями об описании электродных, диффузионных и гидродинамических процессов, процессов увлажнения и сушки в пористых средах, разрабатываемые математические модели должны иметь свои специфические особенности.

В качестве основной физико-химической функции, относительно которой строится математическое описание процессов в пористой среде, как правило, выбирается некоторый потенциал физико-химической реакции, такой, как потенциал электрического поля при рассмотрении электрохимических процессов в пористой среде (E) или потенциал изменения влажности в процессах увлажнения – сушки материалов (φ). Далее рассматривается закон изменения потенциала во времени t в зависимости от градиента потенциала, закономерностей физико-химических превращений и специфики гетерогенных процессов в пористой среде. Если физические условия допускают упрощение задачи, например, в случае, когда процесс можно рассматривать как одномерный и стационарный, то математическое описание существенно упрощается и может быть представлено в более удобной для расчетов форме.

Так, для электрохимических процессов в ПТЭ из УВМ закономерности изменения потенциала электрического поля описываются системой дифференциальных уравнений второго порядка следующего вида:

$$\frac{d^2E}{dx^2} = -\frac{\kappa_l \dfrac{d\kappa_s}{dx}}{\kappa_s\left(\kappa_s+\kappa_l\right)}\frac{dE}{dx} + S_v\left(x\right)\left(\frac{1}{\kappa_s}+\frac{1}{\kappa_l}\right)J\left(x\right), \tag{1}$$

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{S_v}{vzF}J\left(x\right) \tag{2}$$

с граничными условиями

$$C\left(0\right)=C_0,\ \frac{\partial E}{\partial x}\left(0\right)=\frac{1}{\kappa_s}J,\ \ \frac{\partial E}{\partial x}\left(L\right)=\frac{1}{\kappa_l}J \tag{3}$$

и функциональной зависимостью плотности поляризующего тока $J(x)$ от потенциала электрода, концентрации электролита $C(x)$ и электрохимических констант:

$$J\left(x\right)=j_0\frac{\exp\left(\alpha zF\left(E-\varphi_R\right)/RT\right)-\exp\left(\left(\alpha-1\right)zF\left(E-\varphi_R\right)/RT\right)}{1+j_0\exp(\alpha zF\left(E-\varphi_R\right)/RT)/zFK_mC}. \tag{4}$$

Здесь κ_s, κ_l – удельные электропроводности твердой и жидкой фаз; S_v – удельная реакционная поверхность; J – габаритная плотность тока, подаваемого на ПТЭ; L – толщина ПТЭ; x – координата по толщине электрода; C_0 – концентрация металла на входе в электрод; j_0 – плотность тока обмена; α – коэффициент переноса электрохимической реакции; φ_R – равновесный потенциал электрохимической реакции; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура процесса; K_m – коэффициент массопереноса.

В случае решения задачи увлажнения-сушки текстильных материалов стационарное уравнение для потенциала увлажнения можно записать в виде:

$$D \cdot \frac{d^2\varphi}{dx^2} + w\frac{d\varphi}{dx} + \varphi\frac{dw}{dx} = k \cdot F_s \cdot f(\varphi). \tag{5}$$

Здесь w. – скорость движения кондиционированного воздуха сквозь пористую среду; D – усредненный коэффициент диффузии; $kF_S f(\varphi)$ – отрицательный источник, вызванный потерей влаги из увлажняющего воздуха за счет адсорбции влаги в каждой точке объема псевдооднородной среды.

$$\frac{d\varphi}{dx}(0) = -\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho}{Q_{\max}}\left(f(\varphi(0)) - W_0\right), \tag{6}$$

$$\varphi(0,x) = \varphi_0. \tag{7}$$

Если принудительный поток воздуха отсутствует, то есть $w = 0$, то уравнение (5) упрощается. Такая ситуация возможна, например, при моделировании процессов влагопоглощения-сушки известковых композитов. В этом случае рассматривается задача

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} = D\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} - kSf(\varphi), \tag{8}$$

с условиями на границе

$$\varphi(0) = \varphi_0,\ \varphi(L) = \varphi_L. \tag{9}$$

Для задач (5)–(7) и (8)–(9) необходимо определить функцию $f(\varphi)$. Конструирование этой функции следует проводить на основе законов адсорбции-десорбции в различных технологических условиях. Так, например, для случая увлажнения текстильного материала для построения функции источника можно использовать следующие логические рассуждения.

На первом участке кривой скорость роста объема адсорбированной влаги пропорциональна как ее значению при данной влажности W, так и разности ($W_M - W$), где W_M – предельное влагосодержание пористого материала. Это обусловлено, во-первых, тем, что, осаженные молекулы влаги создают дополнительные центры адсорбции, что способствует ускорению увлажнения, а во-вторых, возможностью роста W до точки насыщения W_M. На втором участке изменения φ при $\varphi \geq \varphi_c$ механизм влагонаполнения капиллярно-пористой среды имеет мономолекулярный, а затем и капиллярный характер [7], что определяет экспоненциальный рост W при возрастании φ. Суммирование приведенных рассуждений позволяет определить искомую функцию в виде следующего соотношения:

$$W = k_2 \exp\left(k_1(\varphi - \varphi_c)\right) + \frac{W_M}{1 + (W_M / W_n - 1)\exp(-k\varphi)}. \tag{10}$$

Аналогичные рассуждения позволяют представить функцию источника влаги для задачи влагопоглощения в известковых композитах:

$$W = \begin{cases} \dfrac{W_{\text{н}}}{\dfrac{W_n}{W_M} + \left(1 - \dfrac{W_n}{W_M}\right)e^{-kW_M(\varphi-\varphi_0)}}, & \varphi < \varphi_c, \\ W_M e^{k_2(\varphi-\varphi_c)}, & \varphi \geq \varphi_c. \end{cases} \tag{11}$$

Здесь W_n – начальное значение влагосодержания; W_M – предельно возможное влагосодержание материала; k_1, k_2 и φ_c – рабочие параметры, значение которых определяется

посредством математической обработки экспериментальных кривых с использованием метода наименьших квадратов.

Необходимо заметить, что имеющиеся в описании математических моделей некоторые характеристики ПС и кинетические параметры (например удельная реакционная поверхность S_v, коэффициент пористости материала ε) могут меняться в течение как процессов металлизации, так и влагопоглощения-увлажнения пористого материала, причем как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения своих значений. Изменения могут претерпеть и другие динамические характеристики процессов, например линейная скорость движения электролита или увлажняющего воздуха сквозь пористую среду и др. Необходимые коррекционные действия для технологических и кинетических параметров в процессе физико-химических реакций в пористой среде следует производить в каждом конкретном рассматриваемом случае.

Заключение

Таким образом, в данной работе показана возможность и определены пути решения задач математического моделирования физико-химических процессов в пористых средах, основанные на теоретических представлениях об электродных, диффузионных, миграционных, адсорбционных процессах и их распределении в псевдогомогенных системах. На основе представления пористого материала в виде псевдооднородной среды, характеризуемой усредненными физическими и технологическими параметрами, а также на основе физико-математических описаний процессов в пористой среде построены математические модели и сформулированы краевые условия для расчета распределения физико-химических процессов в объеме рассматриваемой пористой среды при решении задач металлизации углеграфитового материала при создании на его основе композитных и нанокомпозитных материалов, увлажнения волокнистого материала принудительным потоком кондиционированного воздуха, а также задачи поглощения влаги пористыми строительными материалами.

Представленные математические модели, дополненные соответствующими физико-химическими и технологическими параметрами, позволяют проводить численные исследования процессов, на основе которых возможны построение теоретических выводов и положений, а также расчет конкретных технологических процессов с целью определения наиболее благоприятных условий ведения процессов.

Список литературы

1. Амирханов, И.В. Численное исследование модели испарения влаги в строительных материалах / И.В. Амирханов, Э. Павлушова, М. Павлуш, Т.П. Пузынина, И.В. Пузынин, И. Сархадов // Вестник РУДН. Серия: Прикладная и компьютерная математика. – 2005. – Т. 4, № 1. – С. 82–92.

2. Береговой, В.А. Моделирование структуры и прогнозирование свойств пористых композиционных материалов на стеклокристаллической матрице / В.А. Береговой // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 4 (688). – С. 22–29.

3. Еремкин, А.И. Математические модели и методы расчета адсорбции влаги из кондиционированного воздуха в пористом текстильном материале / А.И. Ерёмкин, В.А. Кубис, А.Н. Кошев, В.В. Салмин, Г.И. Грейсух // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 4 (29). – С. 163–172.

4. Крысько, А.В. Математическое моделирование функционально-градиентных пористых геометрически нелинейных микро/наноцилиндрических панелей / А.В. Крысько, Л.А. Калуцкий, А.А. Захарова, В.А. Крысько // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 3. – С. 216–229. – DOI https://doi.org/10.18799/24131830/2024/3/4505.

5. Steeman, M. On coupling 1D non-isothermal heat and mass transfer in porous materials with a multizone building energy simulation model / M. Steeman, A. Janssens, H.J. Steeman, M. Van Belleghem, M. De Paepe // Building and Environment. – 2010. – Vol. 45. – P. 865–877.

6. Зельдович, Я.Б. К теории реакции на пористом или порошкообразном материале / Я.Б. Зельдович // Журнал физической химии. – 1939. – Т. 13. – С. 163.

7. Кошев, А.Н. Расчет эффективного профиля электропроводности электрохимического реактора с проточными трехмерными электродами / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, И.Ф. Сухов // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48, № 2. – С. 195–202.

References

1. Amirkhanov, I.V. Numerical study of the model of moisture evaporation in building materials / I.V. Amirkhanov, E. Pavlushova, M. Pavlush, T.P. Puzynina, I.V. Puzynin, I. Sarhadov // Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Applied and Computer Mathematics. – 2005. – Vol. 4, No 1. – P. 82–92.

2. Beregovoy, V.A. Modeling of structure and prediction of properties of porous composite materials on a glass-crystalline matrix / V.A. Beregovoy // Izvestia of higher educational institutions. Construction. – 2016. – No 4 (688). – P. 22–29.

3. Yeremkin, A.I. Mathematical models and calculation methods of moisture adsorption from conditioned air in a porous textile material / A.I. Yeremkin, V.A. Kubis, A.N. Koshev, V.V. Salmin, G.I. Greysukh // Regional architecture and engineering. – 2016. – No 4 (29). – P. 163–172.

4. Krysko, A.V. Mathematical modeling of functional-gradient porous geometrically nonlinear micro/nanocylindrical panels / A.V. Krysko, L.A. Kalutskiy, A.A. Zakharova, V.A. Krysko // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. – 2024. – Vol. 335, № 3. – P. 216–229. – DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2024/3/4505.

5. Steeman, M. On coupling 1D non-isothermal heat and mass transfer in porous materials with a multizone building energy simulation model / M. Steeman, A. Janssens, H.J. Steeman, M. Van Belleghem, M. De Paepe // Building and Environment. – 2010. – Vol. 45. – P. 865–877.

6. Zeldovich, Ya.B. To the theory of reaction on porous or powdery material / Ya.B. Zeldovich // Journal of Physical Chemistry. – 1939. – Vol. 13. – P. 163.

7. Koshev, A.N. Calculation of the effective conductivity profile of an electrochemical reactor with flowing three-dimensional electrodes / A.N. Koshev, V.K. Varentsov, I.F. Sukhov // Theoretical bases of chemical technology. – 2014. – Vol. 48, No 2. – P. 195–202.

УДК 698 DOI 10.54734/20722958_2024_3_148

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

Аверкин Александр Григорьевич,
доктор технических наук, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru

Орлова Наталья Александровна,
кандидат технических наук,
доцент 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

Averkin Aleksander Grigorevich,
Doctor of Sciences, Professor of the Department «Heat, Gas Supply and Ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

Orlova Natalya Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Assistant Professor of the Department «Heat, Gas Supply 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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА С ВЫТЯЖНЫМ ВОЗДУХОВОДОМ ВНУТРИ ЗОНТА

А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова

Актуальность исследования связана с сохранением историко-культурного наследия в культовых православных сооружениях. В период богослужения в зале сжигаются церковные свечи, в результате горения которых выделяются копоть и сажа, оседающие на убранстве, нанося ему непоправимый ущерб. Для придания убранству прежнего привлекательного вида требуются значительные экономические затраты на реставрационные работы. В статье представлено техническое устройство для улавливания и удаления копоти и сажи в местах их образования, состоящее из подсвечника, зонта с воздуховодом внутри и системы вытяжной вентиляции, разработанное на основе исследования закономерностей температурных и скоростных полей в поперечном сечении теплового потока, образованного теплотой горящих свечей на подсвечнике. Приведены результаты исследования изменения полного давления, температуры и скорости воздуха внутри по высоте вытяжного зонта. Проведены экспериментальные исследования по определению объемной концентрации копоти и сажи на входе зонта и выходе из местной вытяжной вентиляции с применением данного технического устройства. Комплекс исследований позволил определить оптимальную глубину заложения вытяжного воздуховода внутри зонта. В ходе исследования разработаны экспериментальный стенд и методика проведения эксперимента, не имеющая аналогов.

Ключевые слова: климатизация, температура воздуха, скорость воздуха, температура внутренней поверхности, конвективный поток, убранство, церковная свеча, копоть и сажа, храм, концентрация вредностей, полное, естественное и статическое давление воздуха

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF A TECHNICAL DEVICE WITH AN EXHAUST AIR DUCT INSIDE THE DEVICE

A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova

The relevance of the study is related to the preservation of historical and cultural heritage in religious Orthodox buildings. During the service, church candles are burned in the hall, as a result soot and carbon are released, settling on the decoration, causing irreparable damage to it. To give the decoration its former attractive appearance, significant economic costs are required for restoration work. The article presents technical device for capturing and removing soot and carbon in places of formation, consisting of a candlestick, an umbrella with an air duct inside and an exhaust ventilation system developed on the results of study the patterns of temperature and velocity fields in the cross section of the heat flow formed by the heat of burning candles on the candlestick and studies of changes in the total pressure, temperature and air velocity inside the device the height of the exhaust. Experimental studies were conducted to determine the volume concentration of soot and carbon at the entrance of the device and the exit from the local exhaust ventilation using this technical device. The conducted complex of studies allow to determine the optimal depth of the exhaust air duct inside the device. To conduct the study, an experimental stand and a methodology for conducting an experiment developed have been that have no analogues.

Keywords: air conditioning, air temperature, air speed, internal surface temperature, convective flow, decoration, church candle, soot and carbon black, temple, concentration of harmful substances, total, natural and static air pressure

В серию комплекса исследований конвективного потока входят определение закономерностей температурных и скоростных полей в поперечном сечении потока, образованного теплотой от горящих церковных свечей, и измерение полного давления $P_{пз}$, Па, и температуры $t_з$, ºС, воздуха по высоте внутри вытяжного зонта. В данном техническом устройстве удаление копоти и сажи предусматривается через торцевое отверстие воздуховода, установленного внутри зонта (рис. 1). В то же время в комплекс исследований входит определение оптимальной глубины заложения вытяжного воздуховода внутри зонта $h_{воз}$, мм, и объемной концентрации копоти и сажи q, мг/м^3, в удаляемом зонтом воздухе.

Рис. 1. Техническое устройство системы местной вытяжной механической вентиляции с расположением воздуховода внутри зонта и вытяжной магистрали ниже подсвечника:
1 – вытяжной зонт; 2 – подсвечник; 3 – вертикальный воздуховод внутри зонта;
4 – вытяжная магистраль

В ряде работ [2, 3, 4] представлены результаты комплекса подобных исследований с применением другого технического устройства в виде вытяжного зонта, установленного над подсвечником с горящими свечами с удалением копоти и сажи через отверстие, предусмотренное в верхней части зонта, соединенного с воздуховодом местной системой вытяжной вентиляции (рис. 2).

Предлагаемая авторами конструкция технического устройства с воздуховодом внутри зонта впервые применена с учетом особенностей оформления залов богослужения, без нарушения эстетического оформления интерьеров. Удаление копоти и сажи происходит через воздуховод внутри зонта, соединенного с системой местной механической вытяжной вентиляции, магистраль которой рекомендуется располагать не в зале, а в нижележащих технических помещениях собора. Такое техническое решение предлагается впервые и не имеет аналогов, его рекомендуется применять при проектировании, реконструкции и строительстве новых православных храмов.

Рис. 2. Техническое устройство системы местной вытяжной механической вентиляции с удалением копоти и сажи через отверстие в верхней части зонта, соединенного с воздуховодом местной вытяжной вентиляцией:
1 – вытяжной зонт; 2 – подсвечник; 3 – вытяжная магистраль;
4 – стойка подсвечника; 5 – основание подсвечника

Для дальнейших исследований воспользуемся полученными ранее результатами, изложенными в работах [1, 2, 3]. Это данные по определению оптимальной высоты установки вытяжного зонта на расстоянии от нижней кромки до столешни, равном 400 мм, при разной заполняемости подсвечника горящими церковными свечами – 25 % (13 шт.), 50 % (25 шт.), 100 % (50 шт.), а также максимальной скорости на оси входного отверстия зонта $v_{ос}$ = 0,46 – 1,5 м/с, которая является достаточной для эффективного улавливания и удаления копоти и сажи в местах их образования.

В продолжение планируемого комплекса исследований предусматривается получение экспериментальных значений параметров температурных и скоростных полей в поперечном сечении конвективного потока в свободном пространстве вытяжного зонта с воздуховодом внутри для сбора и удаления копоти и сажи от горящих свечей и измерение полного давления $P_{пз}$, Па, и температуры воздуха $t_з$, ºС, по высоте внутри вытяжного зонта, а также объемной концентрации копоти и сажи q, мг/м^3, в удаляемом воздухе в зависимости от количества горящих свечей на подсвечнике и глубины заложения вытяжного воздуховода $h_{воз}$, мм, внутри зонта. В процессе исследования величина давления внутри зонта складывается из естественного $Р_{ез}$, Па, и давления, создаваемого вентилятором $Р_в$, Па. Для проведения комплекса исследований разработан исследовательский лабораторный стенд, позволяющий оценить эффективное применение предлагаемого технического устройства с вытяжным зонтом и с воздуховодом внутри (рис. 3). Предлагаемые стенд и методика проведения экспериментов применяются впервые и не имеют аналогов. При этом авторы частично основывались

на результатах, полученных ранее, в том числе с использованием технического устройства и разработанной методики проведения экспериментов, изложенной в работе [5].

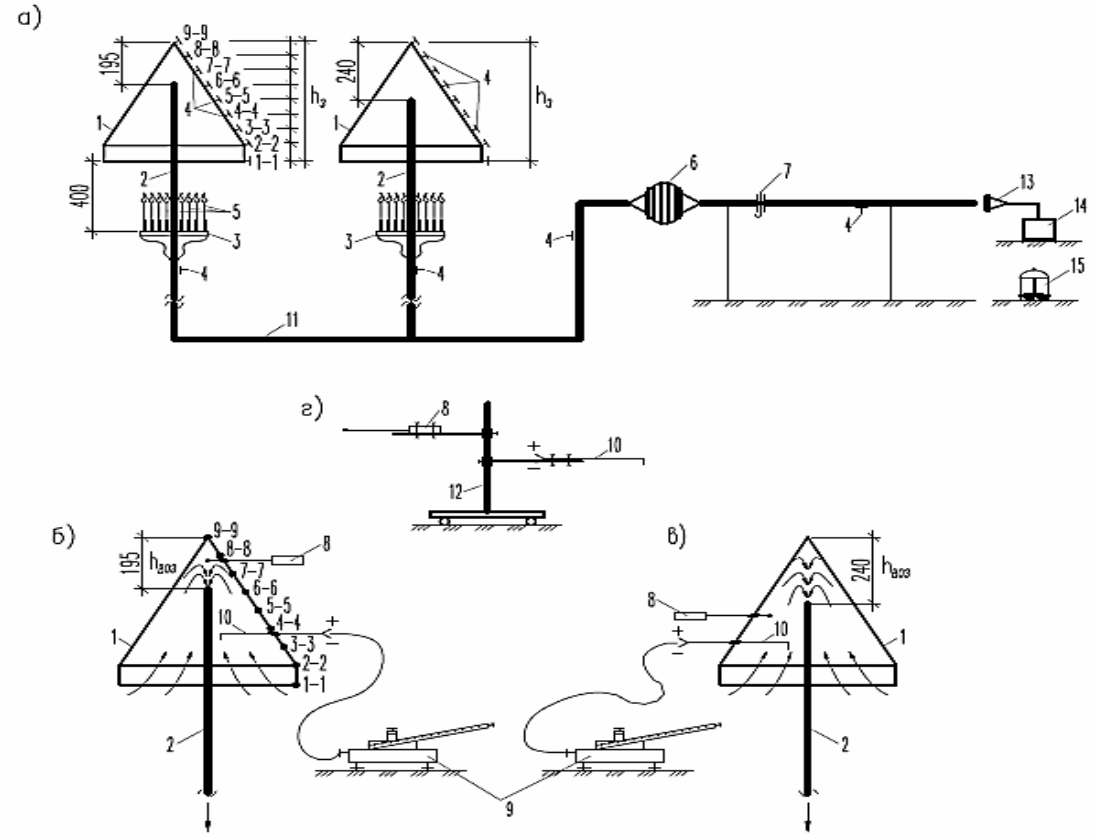


Рис. 3. Экспериментальный стенд системы местной вытяжной вентиляции с удалением загрязненного воздуха через воздуховод внутри зонта:
а – схема экспериментального стенда;
б, в – устройство в виде зонта для улавливания и удаления загрязнений;
1 – зонт; 2 – вытяжной воздуховод (труба) внутри зонта; 3 – столешница;
4 – отверстие для замеров; 5 – свеча; 6 – канальный вентилятор; 7 – шибер; 8 – крепление термоанемометра на штанге координатника; 9 – микроманометр; 10 – трубка «Пито»;
11 – вытяжной магистральный воздуховод; 12 – стойка координатника;
1-1, 9-9 – номер точки замера; 13, 14 – пробоотборник; 15 – электронные весы;
$h_з$ – высота зонта; $h_{воз}$ – расстояние от торца воздуховода до вершины зонта

Предлагаемую авторами уточненную методику планируется применять для исследования закономерностей скоростных полей воздуха на оси конвективного потока $v_{ос,}$ м/с, средней скорости в сечении всасывающего отверстия зонта $v_{ср,}$ м/с, в свободном пространстве зонта $v_{сп}$, м/с, и температурных полей $t_{ос}$, ºС, $t_{ср}$, ºС, $t_{сп}$, ºС, в данном сечении, а также для определения полного статического и естественного давления воздуха внутри вытяжного зонта соответственно $P_{пз}$, Па, $P_{ез}$, Па, $P_{стз}$, Па.

В процессе экспериментальных исследований на лабораторном стенде (см. рис. 1, 3) планируется получить значения вышеуказанных параметров скоростных и температурных полей загрязненного конвективного потока, определить оптимальную глубину заложения воздуховода внутри зонта $h_{воз}$, м, полное давление воздуха внутри зонта $P_{пз}$, Па, в зависимости от количества всасываемого зонтом воздуха $L_{вз}$, м^3/ч, и оптимальной высоты установки зонта над столешней с горящими свечами $h_{сп}$, мм, равной 400 мм, обоснованной ранее проведенными исследованиями [2, 3, 4], а также температуру стока $t_{ст}$, ºС, и количество горящих свечей n, шт., на столешне подсвечника. В результате экспериментальных исследований планируется определить численные значения вышерассмотренных параметров, построить профили скоростей и температур в кон-

вективном потоке в зоне свободного пространства зонта, графики изменения полного давления $P_{пз}$, Па, внутри зонта в зависимости от глубины заложения воздуховода $h_{воз}$, м.

Экспериментальные исследования планируется проводить с шагом по высоте свободного пространства зонта $h_{сп}$, м, через каждые 0,1 м при расходе воздуха $L_{вз}$, м^3/ч, от 100 до 500 м^3/ч, в зависимости от количества размещенных горящих свечей на столешне подсвечника n, равного 25 %, 50 %, 100 %, при 50 установочных местах подсвечника для размещения свечей.

Впервые ставятся задачи по определению оптимального расстояния от торца верха вытяжного воздуховода внутри зонта до вершины зонта, проведению исследования полного давления $P_{пз}$, Па, скорости $v_{вс}$, м/с, и температуры воздуха $t_{вз}$, ºС, по высоте внутри зонта. Измерения планируется проводить в замерных точках по высоте $h_з$, м, через каждые 50 мм с учетом расхода воздуха $L_{вз}$, м^3/ч, от 100 до 500 м^3/ч при количестве горящих свечей на подсвечнике 25 %, 50 %, 100 % (см. рис. 3). Определение вышеуказанных параметров воздуха планируется производить на экспериментальном стенде с использованием оттарированных приборов с требуемым классом точности: аспирационного психрометра Ассмана, термоанемометра типа Testo 440, термоанемометра типа Testo 405, микроманометра ММН 2400, пробоотборника типа Воздух ТУ 92-02.01.018, электронных весов типа САРТОГОСМ СЕ 124-С и др.

Для реализации планируемого эксперимента авторы использовали ранее составленную методику и программу исследования для варианта технического устройства с удалением вредностей через отверстие в верхней части зонта (см. рис. 2), соединенного с системой местной вытяжной вентиляции [2, 3, 4].

Применительно к новым исследованиям в качестве определяющего размера принято расстояние от верхней кромки воздуховода, размещенного внутри зонта, до вершины зонта в пределах 0,195 м и 0,24 м (см. рис. 3). Данные исследование вначале проводились на экспериментальном стенде (см. рис. 3) без размещения на подсвечнике горящих свечей, а затем – с горящими свечами. В дальнейшем экспериментальные исследования с воздуховодом, размещенным внутри вытяжного зонта, выполнялись согласно уточненной методике в следующей последовательности (см. рис. 3):

1. Вначале устанавливалось положение воздуховода внутри зонта $h_{воз}$ на расстоянии 195 мм, на следующем этапе – 240 мм от верха внутреннего воздуховода до вершины зонта.

2. Затем включался канальный вентилятор, и производился замер скорости воздуха термоанемометром типа Testo 440 в магистральном воздуховоде для удаления копоти и сажи диаметром 100 мм, согласно ГОСТ 12.3.018-79 ССБТ. Значение расхода воздуха в воздуховоде соответствует количеству удаленного зонтом воздуха $L_{вз}$, м^3/ч.

3. С применением координатника и термоанемометра, закрепленного на штанге координатника, производились измерения $v_{сп}$, м/с, $t_{сп}$, ºС, $v_{ср}$, м/с, $t_{ос}$, ºС, $v_{ос}$, м/с, в поперечном сечении конвективного потока через каждые 0,1 м, начиная от низа столешни подсвечника до нижней кромки вытяжного зонта. Измерения выполнялись трижды в каждой точке.

4. Определялась средняя скорость воздуха $v_{ср}$, м/с, в зоне всасывающего отверстия вытяжного зонта по ГОСТ 12.3.018-79 ССБТ при трех положениях открытия шибера (максимальная, средняя, минимальная).

5. Производилось измерение объемной концентрации копоти и сажи $q_з$, мг/м^3, в удаляемом воздухе из вытяжного зонта в конце магистрального воздуховода при установочном размере $h_{воз}$ = 195 мм и $h_{воз}$ = 240 мм при различных положениях шибера. В качестве измерительных средств использовались пробоотборник и электронные весы (см. рис. 3, поз. 13, 14, 15).

6. Измерение $t_{ос}$, ºС, $t_{сп}$, ºС, $t_{ср}$, ºС, а также $v_{ос}$, м/с, $v_{сп}$, м/с, $v_{ср}$, м/с, и объемной концентрации копоти и сажи в воздухе $q_з$, мг/м^3, $q_в$, мг/м^3, $q_{сп,}$ мг/м^3, осуществлялось на экспериментальном стенде при $h_{воз}$ = 195 и $h_{воз}$ = 240 мм, при заполняемости подсвечника n, равной 25 %, 50 %, 100 %, аналогично методике, изложенной в пп. 1-5.

7. Выполнялись измерения полного давления воздуха $P_{пз}$, Па, и статического давления $P_{ст.з}$, Па, внутри по высоте зонта $h_з$, мм, с использованием микроманометра

ММН 2400 и трубки «Пито» через отверстие в корпусе вытяжного зонта. Естественное давление внутри зонта $P_{ез}$, Па, определялось расчетным путем.

8. На этапе экспериментов измерялись температура $t_з$, ºС, и скорость воздуха $v_з$, м/с, по высоте $h_з$, мм, внутри зонта с помощью термоанемометра типа Testo 440. Значения $t_з$, ºС, и $v_з$, м/с, определялись через отверстия в корпусе зонта с шагом 50 мм.

Результаты экспериментальных исследований приводятся в статье в виде графиков профилей скоростей и температуры в поперечном сечении конвективного потока в свободном пространстве вытяжного зонта при $h_{воз}$ = 195 мм и $h_{воз}$ = 240 мм и значений объемной концентрации копоти и сажи, улавливаемой и удаляемой вытяжным зонтом $q_з$, мг/м^3, при разных расходах удаляемого воздуха $L_з$, м^3/ч, количествах горящих церковных свечей на подсвечнике n, шт.

В процессе экспериментальных исследований давление воздуха внутри зонта формировалось за счет восходящего конвективного потока от теплоты горящих свечей и разрежения, создаваемого механической вытяжной вентиляцией с воздуховодом внутри зонта [2, 3]. Вытяжной зонт располагался над подсвечником и соответствовал его конфигурации на оптимальной высоте $h_{сп}$ = 400 мм от столешни подсвечника со свечами до нижней кромки вытяжного зонта.

В предлагаемом техническом устройстве с размещением вытяжного воздуховода внутри зонта при $h_{воз}$ =0,195м и $h_{воз}$ = 0,24 м установлено, что конвективный воздушный поток имеет классическую форму и состоит из трех участков, различающихся профилем и значениями скоростей и температур воздуха на участках в свободном пространстве вытяжного зонта $h_{сп}$, мм.

Результаты экспериментальных исследований закономерностей профилей скоростных и температурных полей в поперечном сечении в зоне свободного пространства вытяжного зонта над подсвечником с горящими свечами приведены на рис. 4-5 при n = 25 %, 50 %, 100 %.

Характеристика струи в виде профилей скоростных и температурных полей в поперечном сечении конвективного потока позволяет сделать вывод, что загрязненный воздух в виде стока из зала богослужения движется к вытяжному отверстию зонта по всему объему свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм и $h_{воз}$ = 0,195 м. При $h_{воз}$ = 0,195 м (рис. 4-6) резко сокращается активная область всасываемого зонтом потока от центра всасывания к периферии потока от $v_{ос}$= 0,67 м/с до $v_х$= 0,08 м/с при n =25 %, соответственно от 1,2 до 0,23 м/с при n=50 % и от 1,83 до 0,9 м/с при n=100 %.

Полученные данные подтверждают достаточность $v_{ос}$, м/с, для эффективной работы вытяжного зонта. При этом давление внутри зонта одновременно создавалось за счет работы вытяжного вентилятора (разрежение) и естественного давления (подпор) теплового потока от горящих свечей только при n=100 %; при других значениях n, шт., исследования не проводились.

Авторами проводилась сравнительная оценка $v_{ос}$, м/с, при создании давления внутри зонта только за счет горящих свечей $P_{ез}$, Па, и неработающем вытяжном вентиляторе. В данном случае величина $v_{ос}$= 0,32 м/с, при неработающем вентиляторе, является недостаточной для эффективного улавливания и удаления вредностей при сгорании свечей. Для подтверждения изложенных выше выводов исследовалось также полное давление $P_{пз}$, Па, внутри вытяжного зонта при n=100 % и $h_{воз}$ = 0,195 м. Результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что величина $P_{пз}$= -324,9 Па при работе только вытяжного вентилятора ниже, чем при одновременном действии вытяжного вентилятора и теплового потока (подпор) от горящих свечей $P_{пз}$= -301,4 Па.

Повышение $P_{пз}$= -324,9 Па до $P_{пз}$= -301,4 Па объясняется тем, что вытяжной вентилятор внутри зонта создает давление (разрежение) ниже атмосферного со знаком минус, а тепловой поток от горящих свечей формирует подпор внутри зонта, образуя положительное естественное давление $P_{ез}$, Па, выше атмосферного со знаком плюс. В результате экспериментальных исследований установлено также, что при одновременном действии двух видов давления с разными знаками внутри зонта создается $P_{пз}$= -301,4 Па. Известно, что полное давление внутри зонта образуется за счет суммы

динамического и статического давлений. Динамическое давление имеет внутри вытяжного зонта положительное значение. Статическое давление является частью полного давления и имеет отрицательное значение.

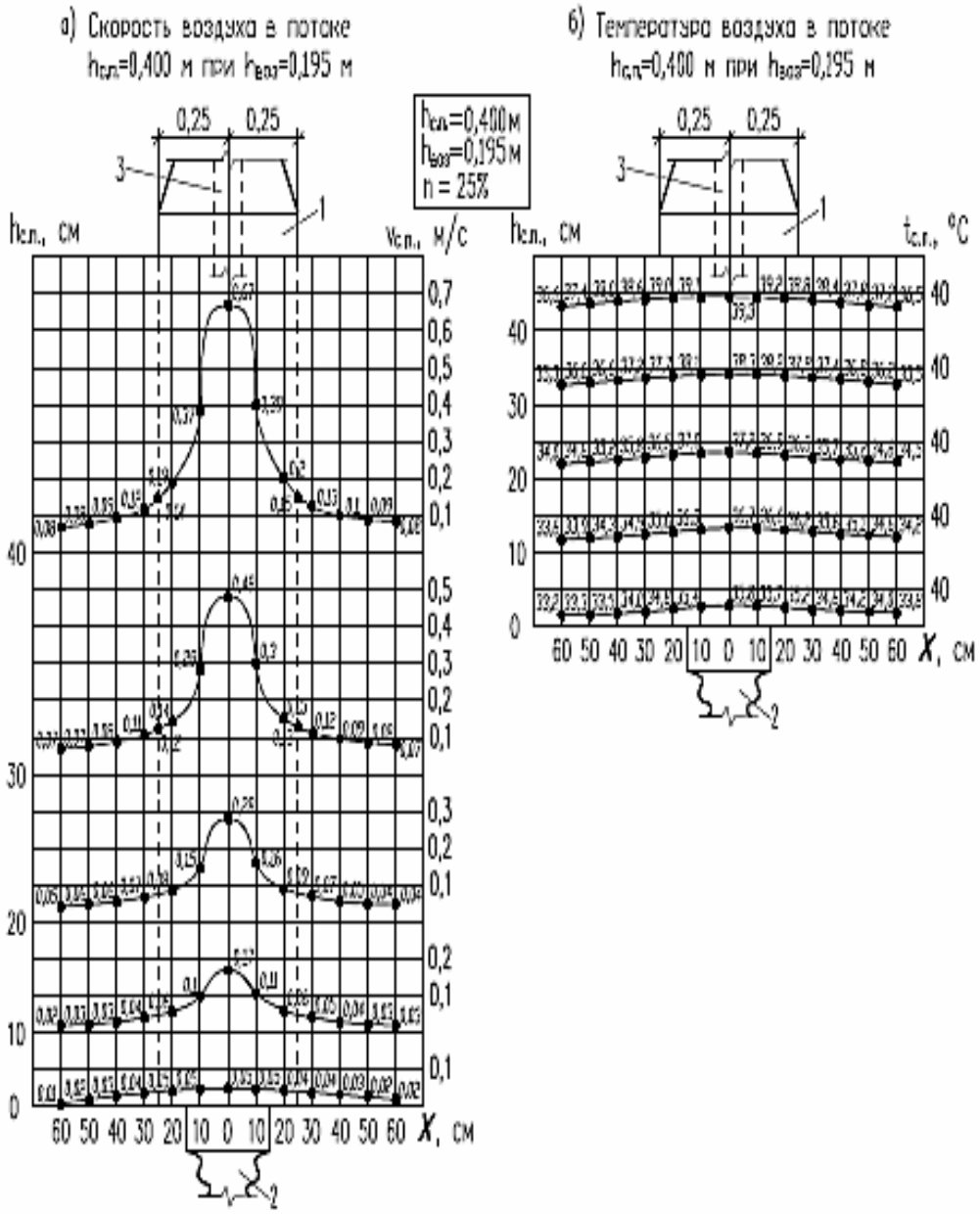


Рис. 4. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм при расстоянии от верха воздуховода внутри зонта до вершины зонта $h_{воз}$ = 195 мм и количестве горящих свечей на столешне подсвечника n=25 % (13 шт.)

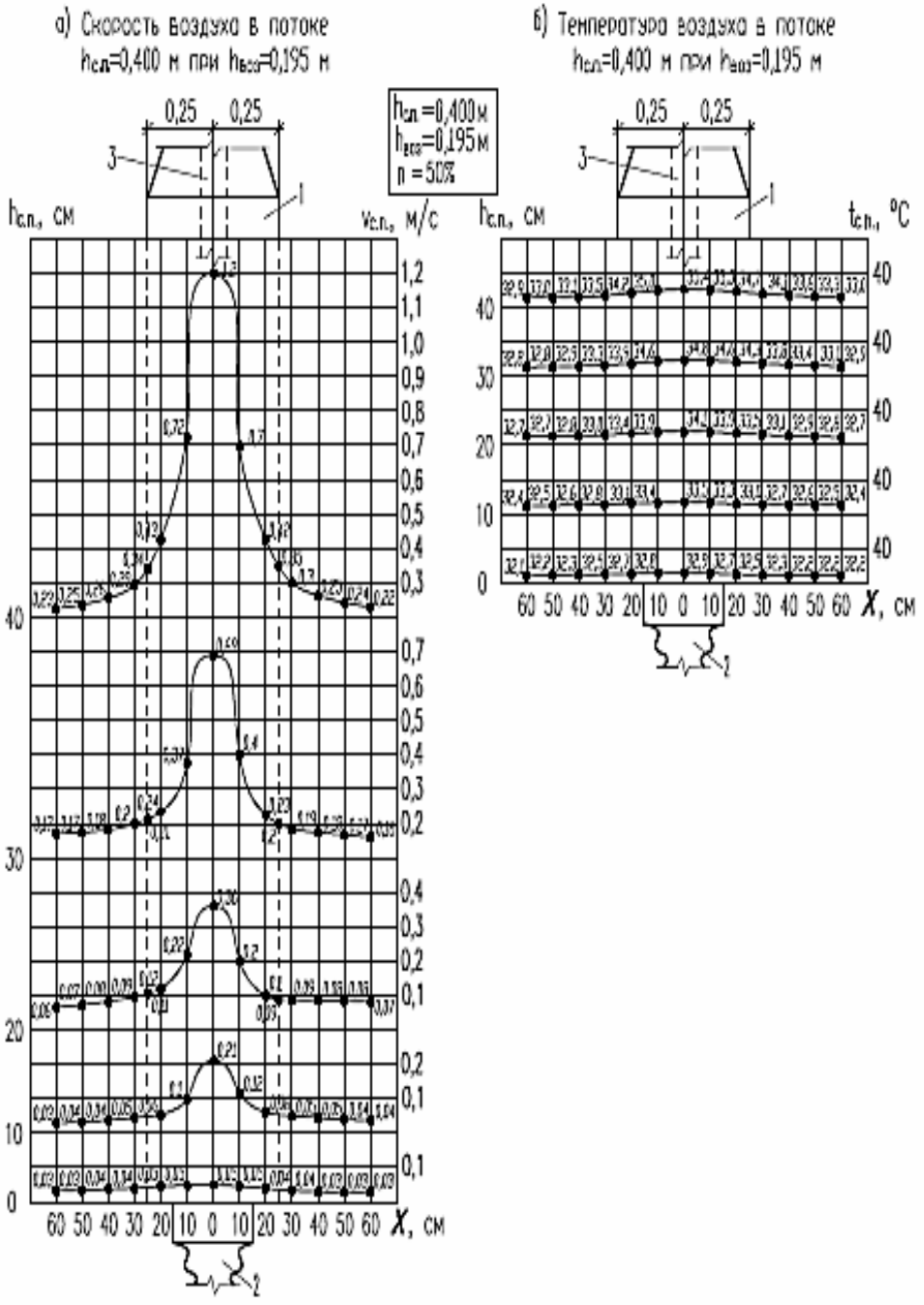


Рис. 5. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм при расстоянии от верха воздуховода внутри зонта до вершины зонта $h_{воз}$ = 195 мм и количестве горящих свечей на столешне подсвечника n=50 % (25 шт.).

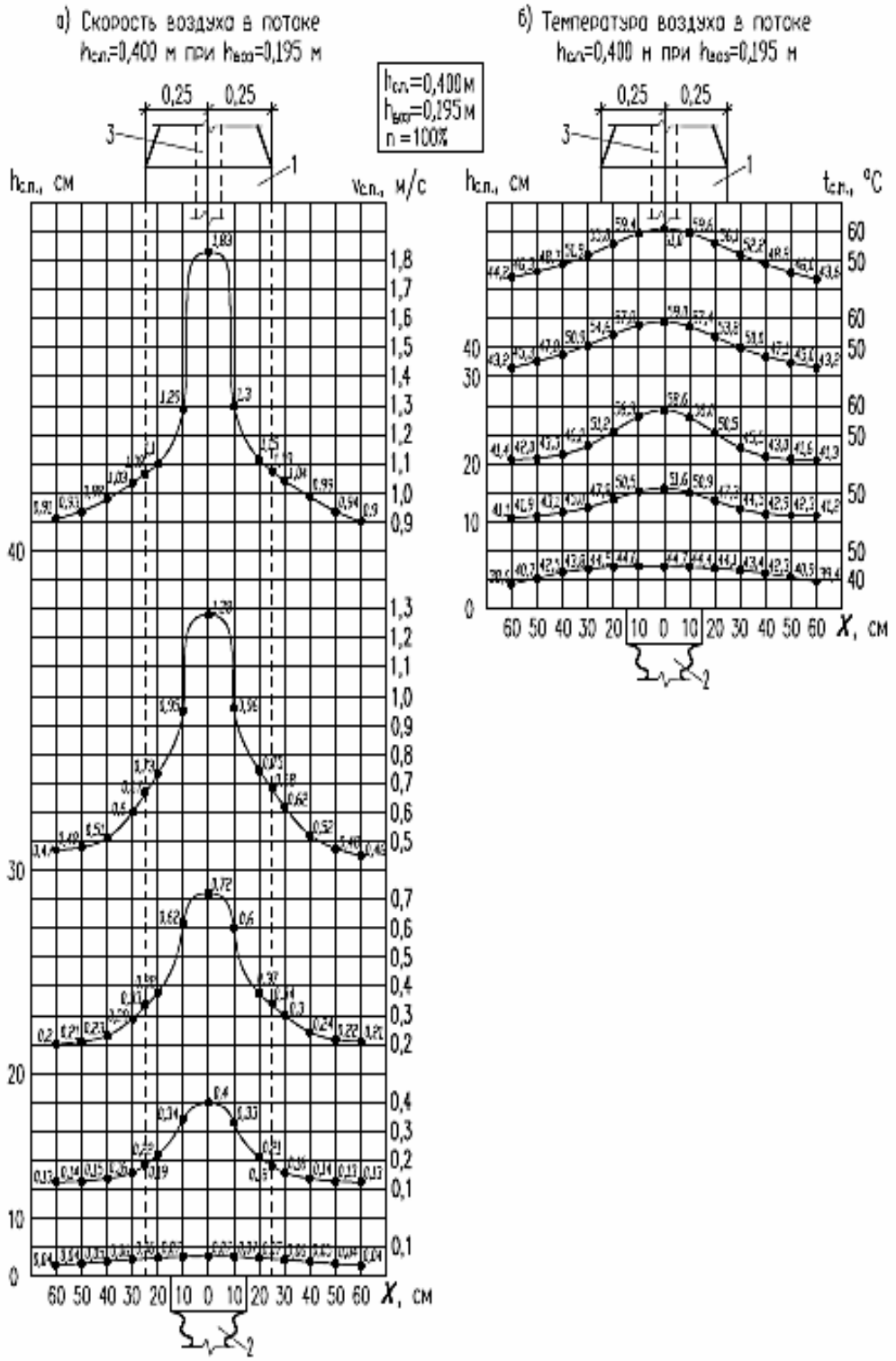


Рис. 6. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм при расстоянии от верха воздуховода внутри зонта до вершины зонта $h_{воз}$ = 195 мм и количестве горящих свечей на столешне подсвечника n=100 % (50 шт.)

Установлено, что статическое давление $P_{стз}$, Па, внутри зонта отрицательное и равно $P_{ст}$= -311,6 Па при одновременно горящих свечах и работе вытяжного вентилятора, а при действии только вытяжного вентилятора без горящих свечей $P_{ст.з}$= -330,8 Па. Из анализа давлений внутри зонта следует, что избыточное статическое давление $P_{стз}$, Па, больше избыточного полного $P_{пз}$, Па. Графики изменения давлений $P_{пз}$, Па, $P_{стз}$, Па, и $P_{ез}$, Па, внутри по высоте вытяжного зонта $h_з$, м, представлены на рис. 7.

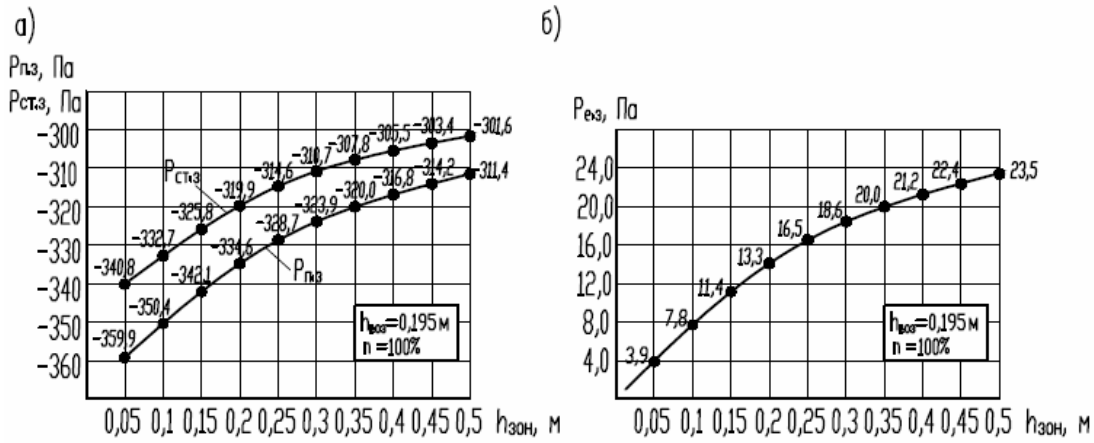


Рис. 7. Графики изменения значений давлений воздуха внутри вытяжного зонта при $h_{воз}$ = 0,195 м, n=100 % и $h_з$ = 0,5 м:
$P_{пз}$ – полное давление, Па; $P_{стз}$ – статическое давление, Па; $P_{ез}$ – естественное давление, Па

Анализ приведенных на рис. 7 графиков позволяет сделать вывод, что давления $P_{пз}$, Па, $P_{стз}$, Па, и $P_{ез}$, Па, и $v_{ос}$, м/с, по высоте зонта $h_з$ = 0,5 м и $h_{воз}$ = 0,195 м увеличиваются и обеспечивают эффективное улавливание и удаление копоти и сажи от горящих свечей в местах их образования над подсвечником в зале богослужения православных храмов, соборов, церквей. Установлено (рис. 7а), что статическое давление $P_{стз}$, Па, внутри зонта больше полного давления $P_{пз}$, Па.

С целью обоснования расстояния от верха воздуховода внутри вытяжного зонта $h_{воз}$, м (см. рис. 3) до вершины зонта проведено дополнительное сравнительное исследование между расстояниями при $h_{воз}$ = 0,195 м и при $h_{воз}$ = 0,25 м с целью анализа осевой скорости $v_{ос}$, м/с, способствующей эффективной работе вытяжного зонта.

Профили скоростных и температурных полей в поперечном сечении потока в зоне свободного пространства вытяжного зонта над подсвечником $h_{сп}$ = 0,4 м и $h_{воз}$ = 0,25 м с горящими свечами при n= 25 %, 50 %, 100 % приведены на рис. 8, 9, 10.

Проведенный комплекс исследований позволил определить оптимальную глубину заложения вытяжного воздуховода $h_{воз}$, м, внутри зонта.

В результате исследования разработано техническое устройство, состоящее из подсвечника, зонта и вытяжного воздуховода, расположенного внутри зонта, и определены конструктивные и установочные размеры данного устройства.

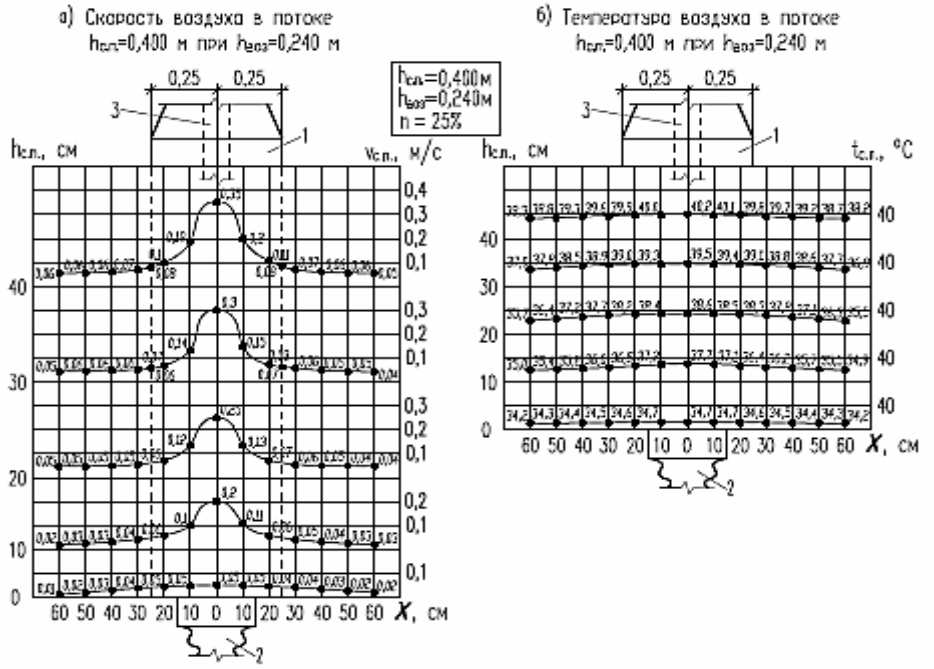


Рис. 8. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм при расстоянии от верха воздуховода внутри зонта до вершины зонта $h_{воз}$ = 240 мм и количестве горящих свечей на столешне подсвечника n=25 % (13 шт.)

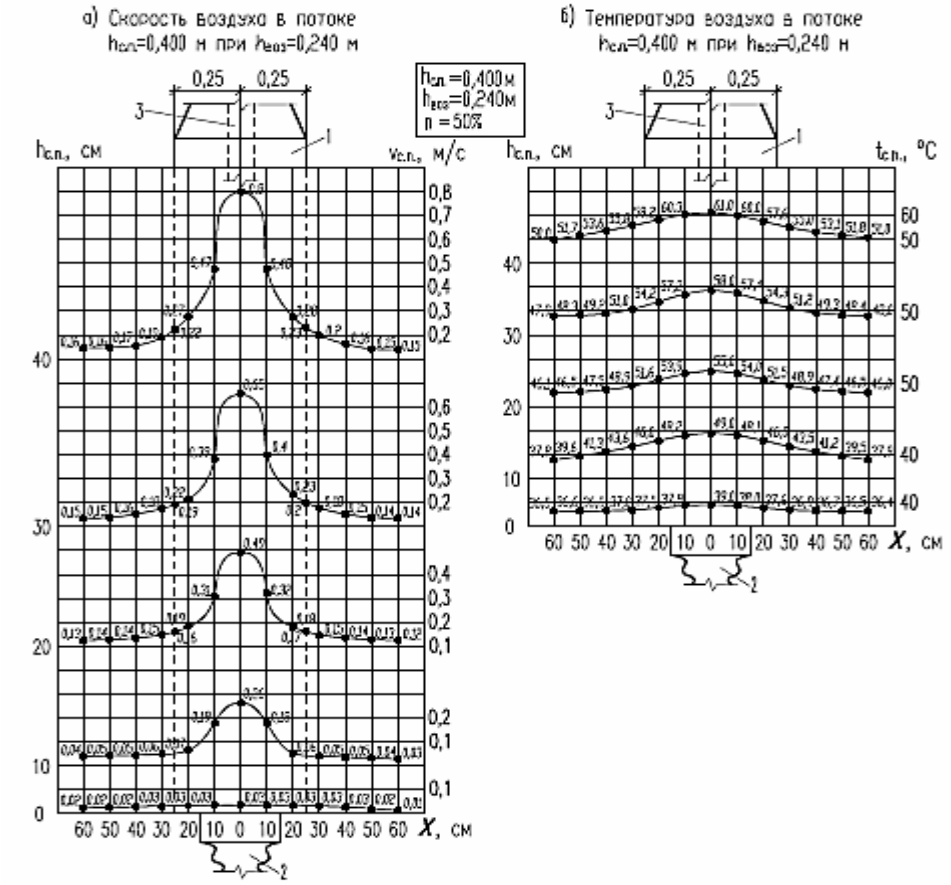


Рис. 9. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм при расстоянии от верха воздуховода внутри зонта до вершины зонта $h_{воз}$ = 240 мм и количестве горящих свечей на столешне подсвечника n=50 % (25 шт.)

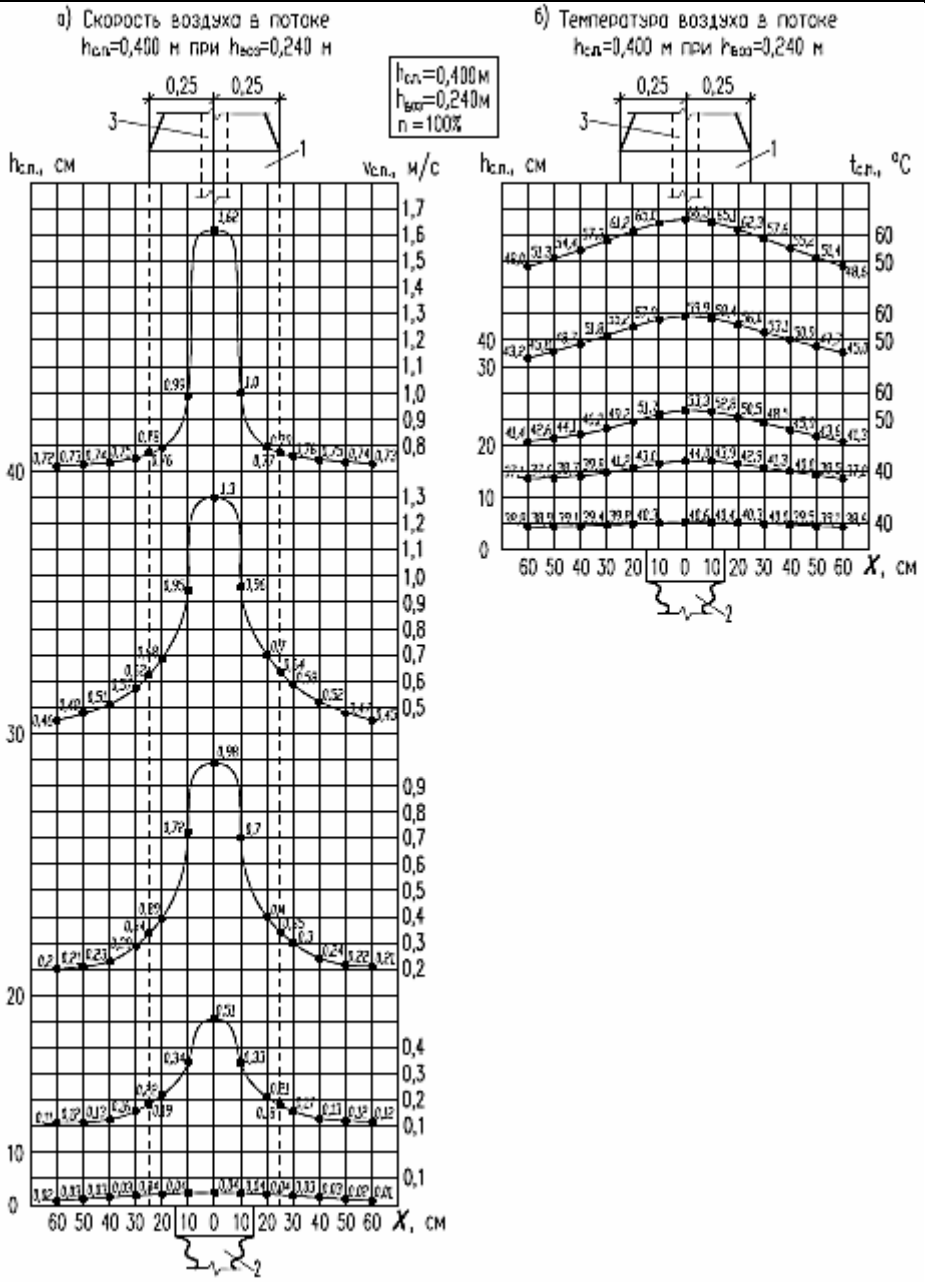


Рис. 10. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм при расстоянии от верха воздуховода внутри зонта до вершины зонта $h_{воз}$ = 240 мм и количестве горящих свечей на столешне подсвечника n=100 % (50 шт.)

Сравнительная оценка $v_{ос}$, м/с, – при $h_{воз}$ = 0,195м $v_{ос}$= 1,83 м/с, а при $h_{воз}$ = 0,25 м $v_{ос}$= 1,63 м/с (см. рис. 10) – позволяет сделать вывод, что величина осевой скорости в зоне всасывания зонта при $h_{воз}$ = 0,195м несколько больше по сравнению с данной скоростью при $h_{воз}$ = 0,25м при равных начальных условиях и для случая максимального количества горящих свечей на подсвечнике n=100 % (50 шт.). Аналогичный вывод можно сделать и для вариантов с n=25 % (13 шт.) и n=50 % (25 шт.), представленных на рис. 4, 5, 8, 9. Установлено, что давления $P_{пз}$, Па, $P_{стз}$, Па, и $P_{ез}$, Па, в сравниваемых вариантах (при $h_{воз}$ = 0,195 м и при $h_{воз}$ = 0,25 м) при расстоянии $h_{воз}$ = 0,195 м больше, чем при $h_{воз}$ = 0,25 м. Следовательно, для практического применения технического устройства, состоящего из вытяжного зонта и подсвечника с церковными свечами, целесообразно размещать вытяжной воздуховод внутри зонта на расстоянии $h_{воз}$ = 0,195м. Это обеспечит эффективное улавливание и удаление копоти и сажи в месте их образования над подсвечником. С целью определения оптимального

значения $h_{воз}$, м, проведены дополнительные исследования изменения температуры теплового воздушного потока внутри вытяжного зонта. Установлено, что интенсивность теплового потока зависит от количества горящих свечей на подсвечнике n, шт., что, в свою очередь, влияет на температуру воздуха в объеме зонта $t_з$, ºС, и, как следствие, на величину естественного давления внутри зонта $P_{ез}$, Па, при разных значениях $h_{воз}$, м. Результаты экспериментальных измерений $t_з$, ºС, по высоте зонта $h_з$, м, и количество горящих свечей представлены в виде графиков на рис. 11.

а б

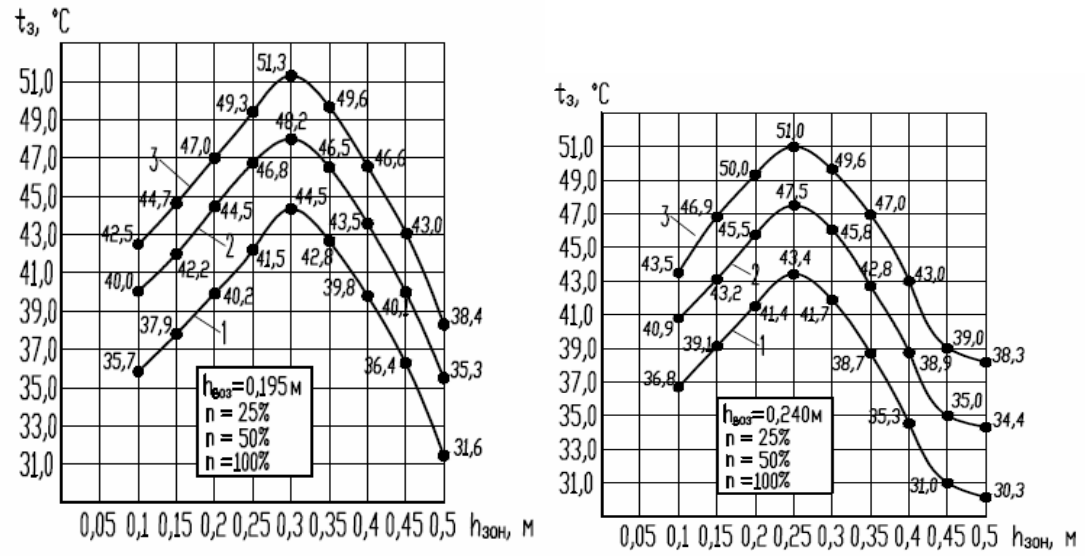


Рис. 11. Графики изменения температуры воздуха по высоте внутри зонта:
1 – при n=25 % (13 шт.); 2 – при n=50 % (25 шт.); 3 – при n=100 % (50 шт.);
а – при $h_{воз}$ = 195 мм; б – при $h_{воз}$ = 250 мм

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что с увеличением количества горящих свечей при $h_{воз}$ = 0,195 м температура воздуха по высоте внутри зонта возрастает и изменяется от 44,5 до 51,3 ºС, а при $h_{воз}$ = 0,25 м – от 43,4 до 51,0 ºС. Сравнительная оценка температуры теплового воздушного потока внутри зонта показала, что более благоприятным решением является устройство $h_{воз}$ = 0,195 м.

Для оценки эффективности применения предложенного авторами технического устройства с вытяжным воздуховодом внутри зонта проведены также экспериментальные исследования по определению объемной концентрации копоти и сажи во всасывающем отверстии зонта $q_з$, мг/м^3, и на выходе из системы местной механической вытяжной вентиляции $q_в$, мг/м^3, только для условия $h_{воз}$ = 0,195 м и n= 100 % (50 свечей), что достаточно для сравнительного анализа.

Для данного технического устройства измерение объемной концентрации копоти и сажи ($q_з$, мг/м^3, $q_в$, мг/м^3) осуществлялось с применением разработанного авторами экспериментального стенда (см. рис. 3) и методики проведения эксперимента. При высоте установки зонта $h_{сп}$ = 0,4 м, $h_{воз}$ = 0,195 м, производительности зонта $L_з$ от 270 до 400 м^3/ч и количестве сжигаемых свечей на подсвечнике n = 100 % (50 свечей) объемная концентрация копоти и сажи в свободном пространстве зонта $q_{сп}$, мг/м^3, и во всасывающем отверстии зонта составляет $q_з$ = 59,4 мг/м^3, а на выходе из системы местной вытяжной механической вентиляции $q_в$ = 53,5 мг/м^3. Снижение объемной концентрации с 59,4 до 53,5 мг/м^3 связано с налипанием копоти и сажи на внутренние поверхности зонта и вытяжной системы воздуховодов, а также с диффузией вредностей и ассимиляцией концентрации удаляемого воздуха. Коэффициент эффективности Э$_з$, %, разработанного технического устройства с вытяжным воздуховодом внутри зонта определяется по следующей формуле и составляет около 90 %:

$$Э_з = \frac{q_в}{q_з} \cdot 100 .$$

Полученные результаты подтверждают эффективность работы технического устройства с вытяжным воздуховодом внутри зонта при $h_{воз}$ = 0,195 м и применения данного устройства для улавливания и удаления копоти и сажи в местах их образования при сжигании церковных свечей на подсвечниках в зале богослужения православных храмов и соборов.

Впервые разработано и запатентовано техническое устройство для улавливания и удаления копоти и сажи от горящих церковных свечей в местах их образования на основе изучения закономерностей температурных и скоростных полей в поперечном сечении теплового потока, образованного теплотой горящих свечей на подсвечнике, и выполнения исследований изменения полного давления, температуры и скорости воздуха внутри по высоте вытяжного зонта. Проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности технического устройства на основе определения объемной концентрации копоти и сажи на входе зонта и выходе из местной вытяжной вентиляции с применением разработанного авторами технического устройства. Комплекс технических и экспериментальных исследований позволяет решить проблемы сохранности исторических и культурных ценностей в православных церквях, храмах и соборах.

Список литературы

1. Марков, Н.А. Оценка эффективности разработанного фильтро-вытяжного зонта для улавливания загрязненных конвективных потоков / Н.А. Марков, С.В. Угорова // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 10. – С. 20–24.

2. Еремкин, А.И. Результаты экспериментальных исследований профилей температурных и скоростных полей в свободном пространстве вытяжного зонта / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2 (55). – С. 117–127.

3. Еремкин, А.И. Аэродинамические характеристики воздушного потока в зоне открытого зонта над подсвечником в православных храмах / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, А.А. Мишин, А.В. Мочалов // Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства: сб. докл. V Национальной научно-практической конференции. – Пенза, 2022. – С. 11–17.

4. Еремкин, А.И. Методика и программа экспериментальных исследований температурных и скоростных полей в зоне всасывающего отверстия вытяжного зонта / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, А.А. Мишин, А.В. Мочалов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 132–139.

5. Еремкин, А.И. Методологические основы исследования параметров потока воздуха в зоне всасывания вытяжного зонта / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 3 (56). – С. 167–179.

6. Еремкин, А.И. Принципы совершенствования климатизации в православных культовых сооружениях: монография / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, А.А. Мишин. – Пенза: ПГУАС, 2023. – 139 с.

7. Патент РФ №2021115919. Подсвечник для культовых сооружений / Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Петрова К.А., Багдасарян А.Г. – № 208995; 26.01.2022.

8. Патент РФ №2021115913. Способ сбора и отвода дыма, копоти, сажи при сгорании свечей от группы подсвечников, установленных в храмах, соборах и других культовых сооружениях / Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Петрова К.А., Багдасарян А.Г. – № 2773457; 03.06.2022.

9. Еремкин, А.И. Разработка и апробация методики расчета воздухообмена на основе определения концентрации сажи и копоти в воздухе при сгорании церковных свечей в православных культовых сооружениях / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева // Приволжский научный журнал. – 2022. – № 6 (2). – С. 119–127.

10. Еремкин, А.И. Комплексное решение локализации загрязнений в процессе сгорания церковных свечей в православных сооружениях / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова, А.А. Мишин, А.В. Мочалов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2. – С. 104–116.

References

1. Markov, N.A. Evaluation of the effectiveness of the developed filter-exhaust hood for capturing contaminated convective flows / N.A. Markov, S.V. Ugorova // Modern science-intensive technologies. – 2022. – No. 10. – P. 20–24.

2. Eremkin, A.I. Results of experimental studies of the profile of temperature and velocity fields in the free space of an exhaust hood / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 2 (55). – P. 117–127.

3. Eremkin, A.I. Aerodynamic characteristics of air flow in the area of an open umbrella over a candlestick in Orthodox churches / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, A.A. Mishin, A.V. Mochalov // Current problems of science and practice in various sectors of the national economy: Collection of reports of the V National Scientific and Practical Conference. – Penza, 2022. – P. 11–17.

4. Eremkin, A.I. Methodology and program for experimental studies of temperature and velocity fields in the area of the suction opening of an exhaust hood / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, A.A. Mishin, A.V. Mochalov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 4 (53). – P. 132–139.

5. Eremkin, A.I. Methodological basis for studying the parameters of air flow in the suction zone of an exhaust hood / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 3 (56). – P. 167–179.

6. Eremkin, A.I. Principles for improving air conditioning in Orthodox religious buildings: monograph / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, A.A. Mishin. – Penza: PGUAS, 2023. – 139 p.

7. RF Patent No. 2021115919. Candlestick for religious buildings / Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Petrova K.A., Bagdasaryan A.G. – No. 208995; 01/26/2022.

8. RF Patent No. 2021115913. Method for collecting and removing smoke, soot, soot when a candle burns from a group of candlesticks installed in churches, cathedrals and other places of worship / Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Petrova K.A., Bagdasaryan A.G. – No. 2773457; 06/03/2022.

9. Eremkin, A.I. Development and testing of a method for calculating air exchange based on determining the concentration of soot and soot in the air during the combustion of church candles in Orthodox religious buildings / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva // Volga Scientific Journal. – 2022. – No. 6 (2). – P. 119–127.

10. Eremkin, A.I.. A comprehensive solution for localizing pollution during the combustion of church candles in Orthodox buildings / A.I. Eremkin, A.G Averkin., I.K. Ponomareva, N.A. Orlova, A.A. Mishin, A.V. Mochalov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2. – P. 104–116.

УДК 697.34 DOI 10.54734/20722958_2024_3_163

Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, г. Красноярск,
пр. Свободный, 79

Колосов Михаил Викторович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплотехника и гидрогазодинамика» Политехнического института Сибирского федерального университета
E-mail: MKolosov@sfu-kras.ru

Липовка Юрий Львович,
доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерные системы зданий и сооружений» Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета
E-mail: YLipovka @sfu-kras.ru

Siberian Federal University
Russia, 660041, Krasnoyarsk, 79,
Svobodny Ave.

Kolosov Mikhail Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Thermal Engineering and Fluid-Gas Dynamics» of the Polytechnic Institute of the Siberian Federal University
E-mail: MKolosov@sfu-kras.ru

Lipovka Yuri Lvovich,
Doctor of Sciences, Professor of the Department «Engi-neering Systems of Buildings and Structures» of the Civil Engineering Institute of the Siberian Federal University
E-mail: YLipovka @sfu-kras.ru

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

М.В. Колосов, Ю.Л. Липовка

Выявлены закономерности распределения тепловой энергии на сезонную нагрузку и горячее водоснабжение (ГВС) для многоквартирного жилого здания в реальных условиях работы сети централизованного теплоснабжения. Проведены исследования режимов теплопотребления более чем 250 действующих зданий с использованием массивов сохраненных данных разработанной авторами системы мониторинга узлов подключения зданий к тепловым сетям. Получены графики фактических режимов теплопотребления в условиях нештатных режимов (снижения температуры в подающем трубопроводе и перепада давлений на вводе тепловой сети). Показано, что предложенная система мониторинга позволяет производить комплексный анализ показаний приборов учета с целью выявления превышения погрешности датчиков, нештатных и аварийных ситуаций, требующих наладки, регулировки или замены оборудования. Выполнена оценка качества автоматического регулирования параметров систем горячего водоснабжения с учетом влияния других систем теплопотребления здания. Установлено, что наличие системы мониторинга режимов работы индивидуальных тепловых пунктов может существенно повысить эффективность применения систем автоматического регулирования, что приведет к повышению качества и энергоэффективности систем теплопотребления зданий в целом.

Ключевые слова: горячее водоснабжение, тепловой пункт, теплогидравлический режим, автоматизированное управление, компьютерный мониторинг

ANALYSIS OF HOT WATER SUPPLY OPERATION MODES USING THE DEVELOPED MONITORING SYSTEM

M.V. Kolosov, Y. L. Lipovka

The patterns of distribution of thermal energy for seasonal load and hot water supply (DHW) for a multi-apartment residential building in real operating conditions of a centralized heating network have been identified. Studies of heat consumption regimes of more than 250 existing buildings have been carried out using stored data arrays developed by the authors of a system for monitoring the nodes connecting buildings to heating networks. Graphs of actual heat consumption modes under

abnormal conditions (decrease in temperature in the supply pipeline and pressure drop at the input of the heating network) are obtained. It is shown that the proposed monitoring system allows a comprehensive analysis of meter readings, which makes it possible to identify excess sensor errors, abnormal and emergency situations requiring adjustment or replacement of equipment. The quality of automatic control of parameters of hot water supply systems is assessed, taking into account the influence of other heat consumption systems of the building. It has been established that the presence of a system for monitoring the operating modes of individual heating points can significantly increase the efficiency of using automatic control systems, which lead to an increase of the quality and energy efficiency of heat consumption systems of buildings in general.

Keywords: hot water supply, heat supply unit, thermal-hydraulic mode, automated control, computer monitoring

В жилом секторе значительный вклад в энергопотребление домохозяйств вносит нагрев воды для бытовых нужд (ГВС). По мере повышения теплового сопротивления ограждающих конструкций доля энергии, расходуемой на отопление и охлаждение помещений, снижается, что делает ГВС одной из доминирующих энергетических нагрузок в зданиях с высокими эксплуатационными характеристиками. Таким образом, даже небольшие усовершенствования в управлении энергопотреблением систем ГВС могут обеспечить значительную экономию энергии в жилых зданиях.

Недостаточной остается информация о точном учете и справедливых тарифах применительно к ГВС. В последнее время были приняты различные политические меры и проведено несколько исследований, направленных на понимание и снижение энергопотребления в сфере ГВС. Согласно [1], поведение жильцов оказывает большое влияние на энергопотребление жилых помещений; в частности, количество тепловой энергии на нужды отопления в жилом секторе можно регулировать с помощью современных строительных технологий, например с помощью теплоизоляции или управления солнечной радиацией [2], в то время как данные решения оказывают незначительное влияние на ГВС.

Помимо управления поведением пользователей, существуют и другие способы оптимизации конфигурации систем для снижения энергопотребления ГВС, например, когда управляющий зданием рассматривает возможность использования низкотемпературного источника возобновляемой энергии, такого, как тепло от солнечных батарей или топливных элементов. В настоящее время, если архитектор здания может использовать в своих проектах оптимальный профиль потребления ГВС, то становится возможным построить оптимизированную систему с соответствующей стратегией эксплуатации [3]. Разработали метод [4] разделения измеренного теплового потребления на нужды отопления и ГВС. Провели классификацию [5] существующих исследований на основе типов профилей спроса на энергию, которые использовались для планирования распределенной энергетики, либо путем разделения месячных данных, агрегированных по времени, либо путем создания детальных энергетических профилей на основе категориального сходства, статистической корреляции и машинного обучения. Несмотря на важность профиля спроса на ГВС, во многих исследованиях использовались синтетические профили, технические стандарты или профили, полученные с помощью моделирования [6-7].

Для обеспечения точности профилей спроса на ГВС необходимо провести исследования по измерению фактического потребления ГВС. Измеряли расход ГВС и температуру [8] с интервалом в 1 мин в 119 домохозяйствах. Результаты показали, что суточное потребление горячей воды на одно домохозяйство составляет 172 л, а средняя температура подачи воды – 51.8 °C. В [9] измеряли расход электроэнергии и ГВС с интервалом в 6 с для 72 домохозяйств, но измеряли только расход. Хотя период измерений был относительно коротким, зимой собирались данные в течение пяти дней, при этом пиковое потребление ГВС увеличилось на 40 % по сравнению с измеренным значением с интервалом в 1 мин. Измерили объем ГВС [10] в 182 домохозяйствах с помощью индивидуальных счетчиков. В двухлетнем исследовании измерения проводились один раз в месяц в течение первого года и один раз в день в течение второго года. Было установлено, что суточное потребление на душу населения

составило 43 л; также представлены ежемесячные поправочные коэффициенты, основанные на данных, полученных за два года.

При использовании коммерческих приборов учета сбор данных осуществляют без установки дополнительных устройств. Преимуществом такого подхода является возможность сбора данных в течение длительного времени. Однако изменить цикл учета таких приборов обычно невозможно, и эти приборы, как правило, отображают или передают только общее потребление, на основании которого выставляется счет [11-12].

Для анализа показаний приборов учета удобно использовать телеметрические системы – системы дистанционного снятия показаний. Для анализа систем ГВС нами была разработана система мониторинга, включающая в себя анализ различных схем подключения коммерческих приборов учета. Система мониторинга состояния системы теплоснабжения потребителей тепла – это комплексная система наблюдений, оценки и прогноза различных параметров, таких, как энергоэффективность и надежность; поэтому простой установки границ измеряемых значений недостаточно для анализа таких параметров, и требуются более комплексные методы обработки данных. Система мониторинга разработана в качестве веб-сервиса, с интерфейсом, доступным через браузер, и предоставляет доступ к исходным данным и системе анализа из любой точки мира. Система мониторинга позволяет получать данные как с приборов учета непосредственно, используя для этого связь по модему или подключение к сети Ethernet, так и с других телеметрических систем, что позволяет неограниченно масштабировать данное решение. С помощью нашей системы можно производить анализ показаний как для систем отопления, так и для систем ГВС, что позволит быстрее принимать решения по поводу предпринимаемых действий в случае аварийных ситуаций и тем самым повысить качество обслуживания инженерных систем зданий. На сегодняшний день с данной системой работают диспетчеры организаций, осуществляющих обслуживание инженерных систем зданий, используя личный кабинет, где они получают доступ к инструментам анализа по всем их объектам. Весь графический материал, представленный в данной статье, является примером интерфейса инструментов анализа.

Для примера рассмотрим систему анализа, использующую схему подключения с применением контрольных приборов учета. Для демонстрации системы мониторинга выбрано одно из панельных многоквартирных жилых зданий, расположенное в г. Красноярске и использующее централизованное теплоснабжение в период с 12 декабря 2022 года по 11 декабря 2023 года. Измерения проводились один раз в день в течение всего периода, основными параметрами систем ГВС являются температура подающей линии, расход теплоносителя и тепловая нагрузка.

Согласно СанПиН 2.1.3684-21 температура горячей воды в местах водоразбора централизованной системы горячего водоснабжения должна быть не ниже плюс 60 °С и не выше плюс 75 °С. Обозначим данный интервал в качестве нормальной работы системы ГВС. Сравнение действительной температуры подающей линии системы ГВС и режима нормальной работы показано на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что в отопительный период для данного здания наблюдаются отклонения действительной температуры подающей линии системы ГВС от режима нормальной работы, что говорит о сильной связи системы управления тепловой нагрузкой систем отопления и ГВС.

Для оценки работы регулирующих устройств системы горячего водоснабжения можно воспользоваться зависимостью температуры горячего водоснабжения от температуры наружного воздуха (рис. 2). Из представленной зависимости видно, что на данном узле при снижении температуры наружного воздуха система регулирования не способна получать требуемую температуру горячего водоснабжения, и поэтому необходима ее модернизация.

Расход воды в системе ГВС является очень неравномерным, поэтому для его оценки было принято решение производить усреднение измеренных значений за

предыдущие семь дней. График средненедельного расхода теплоносителя системы ГВС показан на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что средненедельный расход теплоносителя для данного здания также является неравномерным, однако для данного параметра проще установить значение максимального потребления при анализе системы. Согласно федеральному закону №416-ФЗ, к показателям надежности объектов централизованных систем горячего водоснабжения относятся показатели бесперебойности водоснабжения. Фактические значения показателей надежности определяются уполномоченными органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации в порядке, установленном законодательством Российской Федерации. Для оценки бесперебойности водоснабжения можно воспользоваться вероятностью обеспечения потребителей горячей водой.

Потребление горячего водоснабжения носит случайный характер, поэтому можно предположить, что оно подчиняется закону нормального распределения Гаусса–Лапласа. Для проверки данной гипотезы для каждой системы горячего водоснабжения автоматически рассчитываются математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение в отопительный период, после чего строятся действительное и нормальное распределения расхода воды на систему горячего водоснабжения, которые представлены на рис. 4.

Для оценки распределения воспользуемся «правилом трех сигм». Для текущего распределения количество значений, отличающихся от среднего на число, меньшее, чем одно стандартное отклонение, составляет 72.17 % выборок. В то же время количество значений, отличающихся от среднего на два стандартных отклонения, составляет 95.28 %, а на три стандартных отклонения – 99.06 %. Для нормального распределения эти величины составляет 68.27 %, 95.45 % и 99.73 % соответственно, что говорит в пользу подтверждения данной гипотезы. Это означает, что если система способна предоставить расход горячей воды, равный среднему расходу плюс двойному стандартному отклонению, то она обеспечит всех потребителей с вероятностью, близкой к 95 %.

С помощью закона распределения можно предсказать вероятность использования системы горячего водоснабжения, что может помочь при проектировании таких систем с учетом необходимой вероятности обеспечения всех потребителей, а также при выявлении аномалий в потреблении теплоносителя горячего водоснабжения на действующих объектах.

Другой немаловажной характеристикой системы горячего водоснабжения является тепловое потребление. График сравнения теплового потребления систем отопления и ГВС изображен на рис. 5.

На рис. 5 $T_{нв}$ представляет собой температуру наружного воздуха за исследуемый период, Q – тепловую нагрузку на ГВС, $Q_{системы}$ – тепловую нагрузку на систему теплоснабжения в целом, включая отопление и ГВС, Q_{max} – уставку, при достижении которой значений Q будет срабатывать сигнал тревоги. В настоящее время данная уставка определяется опытным путем для каждого объекта отдельно. Из рис. 5 видно, что тепловая нагрузка системы ГВС для данного здания много меньше тепловой нагрузки системы отопления.

Согласно правилам организации коммерческого учета, в случае различия показаний контрольных (параллельных) приборов учета тепловой энергии и основных приборов тепловой энергии более чем на погрешность измерения таких приборов учета, лицо, установившее контрольный прибор учета, может потребовать у другой стороны проведения внеочередной поверки эксплуатируемого этой стороной прибора учета. Данное правило приобретает особую актуальность в период отсутствия подачи тепловой энергии на нужды отопления, так как показания теплового потребления всей системы должны совпадать со значениями теплопотребления системы ГВС. Из рис. 5 видно, что в летний период показания двух систем практически идентичны. При превышении разницы теплового потребления двух систем более чем на погрешность измерения приборов учета подается аварийный сигнал.

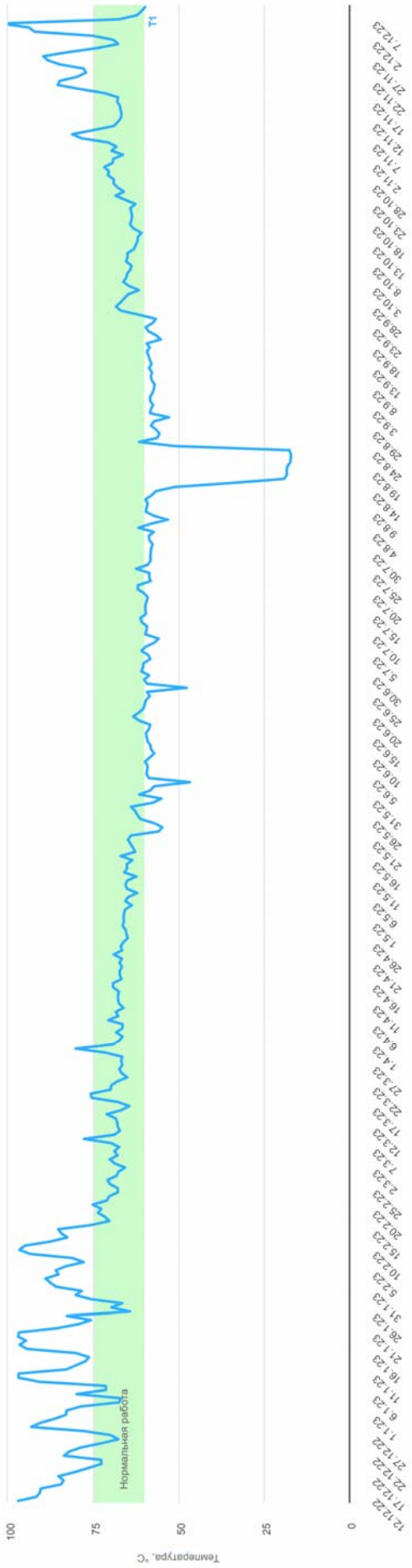


Рис. 1. График температуры подающей линии системы ГВС

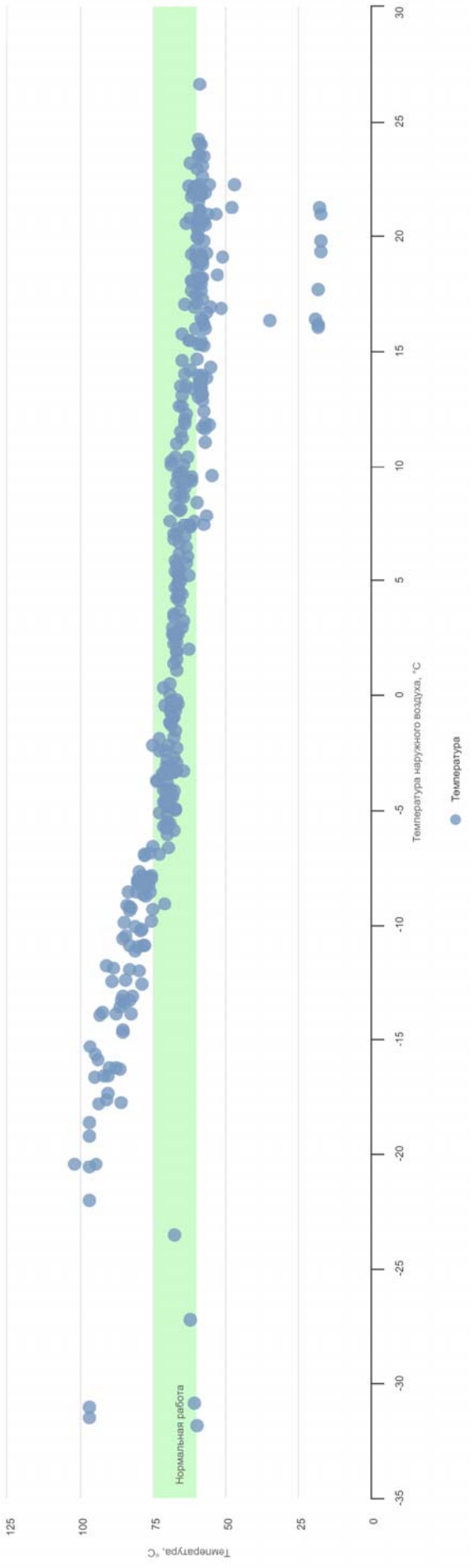


Рис. 2. Зависимость температуры ГВС от температуры наружного воздуха

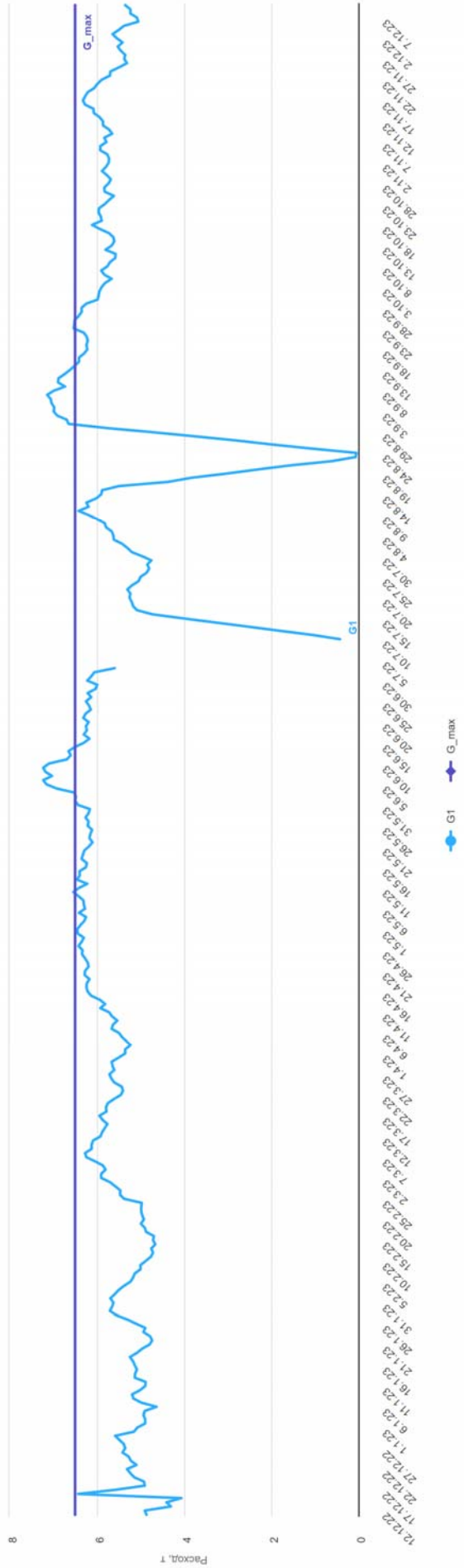


Рис. 3. График средненедельного расхода теплоносителя системы ГВС

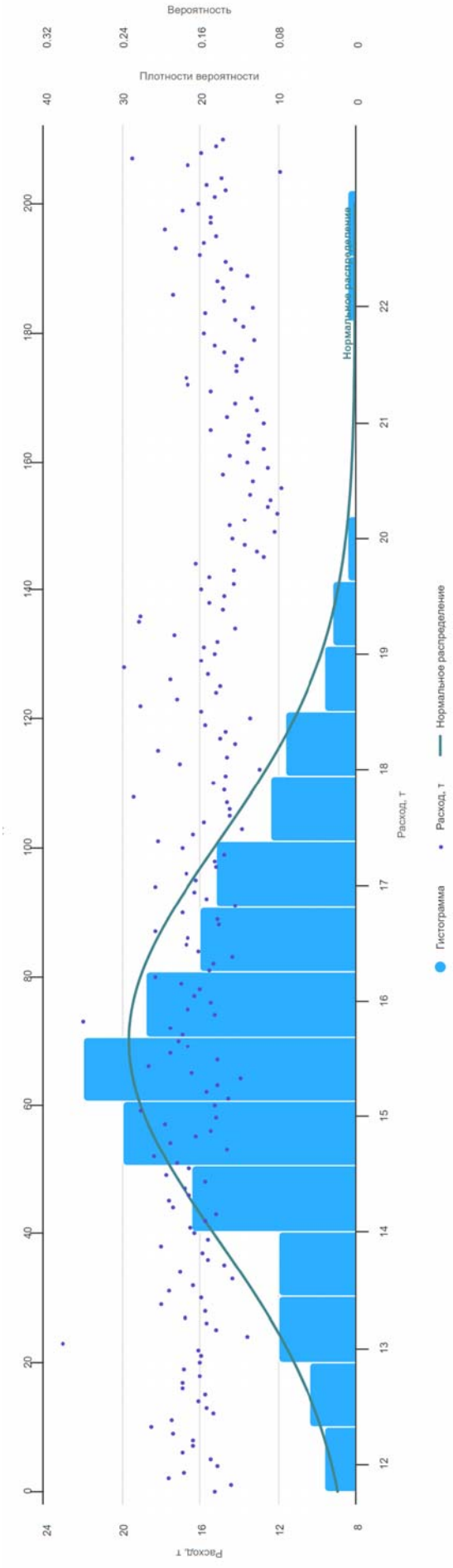


Рис. 4. Гистограмма потребления воды на нужды ГВС

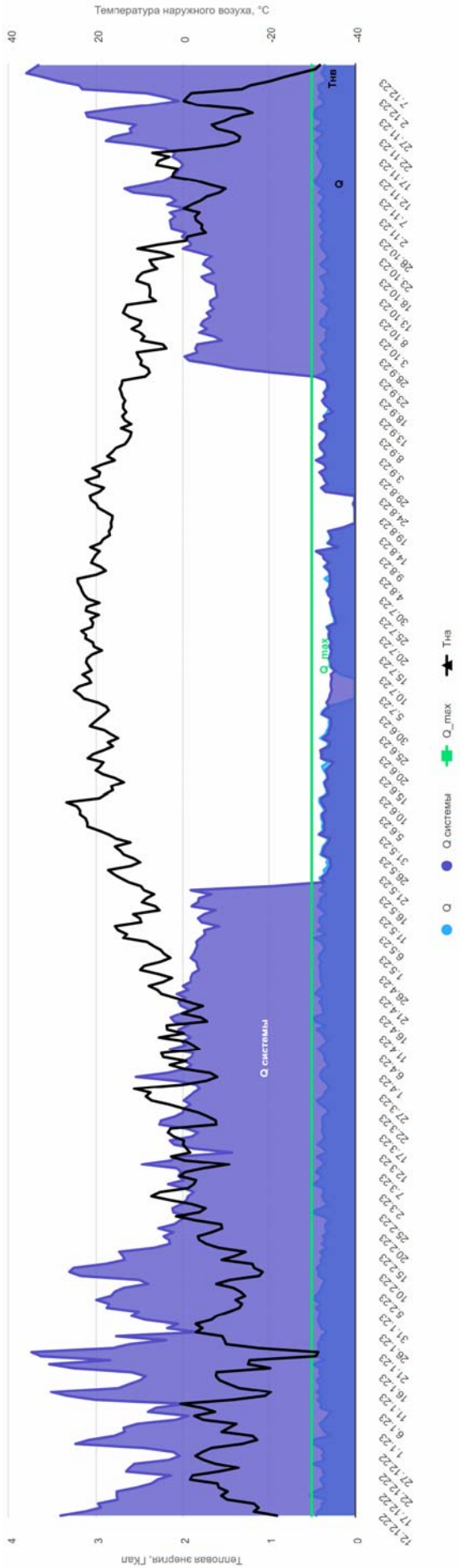


Рис. 5. График сравнения теплового потребления систем отопления и ГВС

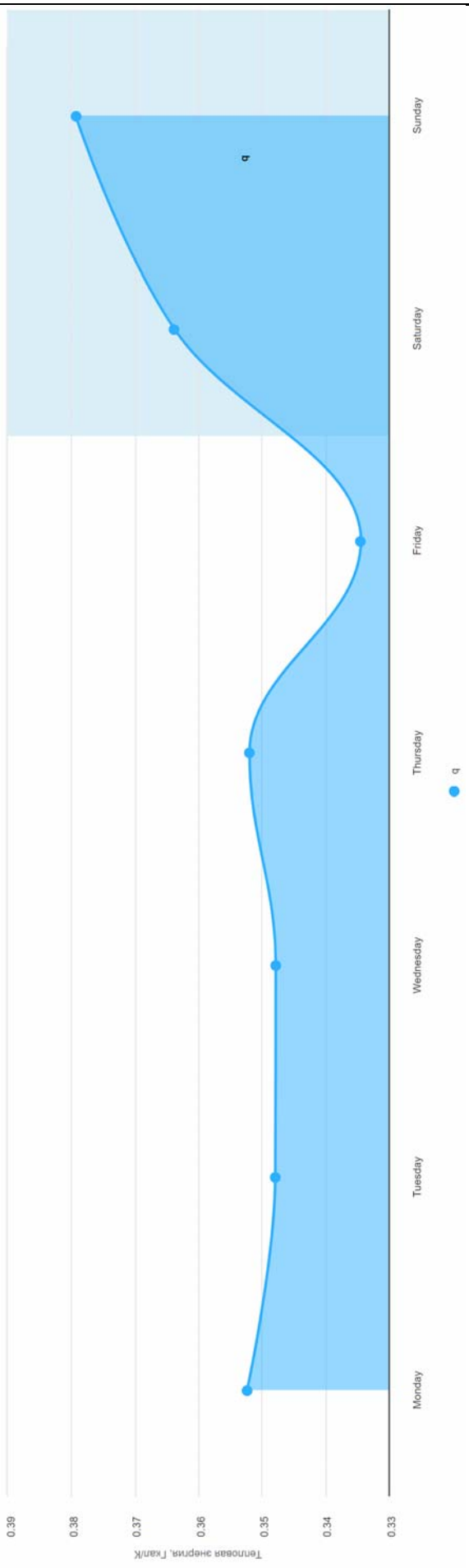


Рис. 6. График теплового потребления по дням недели системы ГВС

Система мониторинга также позволяет анализировать другие параметры системы ГВС, такие, как, например, зависимость теплового потребления от дня недели. График теплового потребления по дням недели системы ГВС представлен на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что максимальное теплопотребление системы ГВС достигается в воскресенье.

В данном исследовании изучалось потребление энергии и расхода ГВС для многоквартирного жилого здания с централизованным теплоснабжением. Для анализа была использована созданная система мониторинга, которая позволяет в реальном времени выявлять как количественные, так и качественные аспекты систем ГВС. Используя данную интеллектуальную систему, можно получить различную информацию как о поведении потребителей ГВС, так и о тепловом потреблении на нужды отопления. Развитие систем мониторинга является частью реализации идеи цифровой экономики с использованием облачных технологий и цифровых платформ. Следующий этап системы мониторинга может быть направлен на создание моделей прогнозирования ГВС с применением моделей искусственного интеллекта, что может обеспечить основу для создания стандартов будущей оптимальной системы ГВС.

Список литературы

1. Teres-Zubiaga, Jon.The role of the design and operation of individual heating systems for the energy retrofits of residential buildings / Teres-Zubiaga Jon, Celador Alvaro, Gonzalez-Pino Iker, Gonzalo Diarce // Energy Convers Manag. – 2016. – Vol. 126. – P. 736–747.

2. Emery, A.F. A long term study of residential home heating consumption and the effect of occupant behavior on homes in the Pacific Northwest constructed according to improved thermal standards / A.F. Emery, C.J. Kippenhan // Energy. – 2006. – Vol. 31. – P. 677–693.

3. Juan de Santiago. The generation of domestic hot water load profiles in Swiss residential buildings through statistical predictions / Juan de Santiago, Rodriguez-Vialon Osvaldo, Sicre Benoit // Energy and Buildings. – 2017. – Vol. 141.

4. Ivanko Dmytro. Splitting measurements of the total heat demand in a hotel into domestic hot water and space heating heat use / Ivanko Dmytro, Lekang Sørensen Åse, Nord Natasa // Energy. – 2021. – Vol. 219.

5. Ferrari, Simone. Results of a literature review on methods for estimating buildings energy demand at district level / Simone Ferrari, Federica Zagarella, Paola Caputo, Antonino D'Amico // Energy. – 2019. – Vol. 175. – P. 1130 – 1137.

6. Липовка, Ю.Л. Использование геоинформационных систем в решении задач проектирования тепловых сетей / Ю.Л. Липовка, А.С. Венин, А.Ю. Липовка, М.В. Колосов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 11 (779). – С. 60–72.

7. Best, Isabelle. Systematic investigation of building energy efficiency standard and hot water preparation systems' influence on the heat load profile of districts / Isabelle Best, Hagen Braas, Janybek Orozaliev, Ulrike Jordan, Klaus Vajen // Energy. – 2020. – Vol. 197.

8. Lund, Henrik. 4th Generation District Heating (4GDH): integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems / Henrik Lund, Sven Werner, Robin Wiltshire, Svend Svendsen, Jan Eric Thorsen, Frede Hvelplund, Brian Vad Mathiesen // Energy. – 2014. – Vol. 68. – P. 1–11.

9. Juan de Santiago.The generation of domestic hot water load profiles in Swiss residential buildings through statistical predictions / Juan de Santiago, Rodriguez-Vialon Osvaldo, Sicre Benoit. // Energy and Buildings. – 2017. – Vol. 141. – P. 341–348.

10. Ivanko Dmytro. Splitting measurements of the total heat demand in a hotel into domestic hot water and space heating heat use / Ivanko Dmytro, Lekang Sørensen Åse, Nord Natasa. // Energy. – 2021. – Vol. 219.

11. Ferrari, Simone. Results of a literature review on methods for estimating buildings energy demand at district level / Simone Ferrari, Federica Zagarella, Paola Caputo, Antonino D'Amico // Energy. – 2019. – Vol. 175. – P. 1130–1137.

12. Emilio-José Sarabia-Escriva. Economic and environmental analysis of domestic hot water systems for single-family homes / Emilio-José Sarabia-Escriva, Víctor-Manuel Soto-Francés, José-Manuel Pinazo-Ojer, Salvador Acha.// Energy and Buildings. – 2023. – Vol. 286.

References

1. Teres-Zubiaga, Jon.The role of the design and operation of individual heating systems for the energy retrofits of residential buildings / Teres-Zubiaga Jon, Celador Alvaro, Gonzalez-Pino Iker, Gonzalo Diarce // Energy Convers Manag. – 2016. – Vol. 126. – P. 736–747.

2. Emery, A.F. A long term study of residential home heating consumption and the effect of occupant behavior on homes in the Pacific Northwest constructed according to improved thermal standards / A.F. Emery, C.J. Kippenhan // Energy. – 2006. – Vol. 31. – P. 677 – 693.

3. Juan de Santiago. The generation of domestic hot water load profiles in Swiss residential buildings through statistical predictions / Juan de Santiago, Rodriguez-Vialon Osvaldo, Sicre Benoit // Energy and Buildings. – 2017. – Vol. 141.

4. Ivanko Dmytro. Splitting measurements of the total heat demand in a hotel into domestic hot water and space heating heat use / Ivanko Dmytro, Lekang Sørensen Åse, Nord Natasa // Energy. – 2021. – Vol. 219.

5. Ferrari, Simone. Results of a literature review on methods for estimating buildings energy demand at district level / Simone Ferrari, Federica Zagarella, Paola Caputo, Antonino D'Amico // Energy. – 2019. – Vol. 175. – P. 1130 – 1137.

6. Lipovka, Yu.L. Use of geoinformation systems in solving the problems of heat networks design / Yu.L. Lipovka, A.S. Venin, A.Yu. Lipovka, M.V. Kolosov // News of higher educational institutions. Construction. – 2023. – № 11 (779). – P. 60–72.

7. Best, Isabelle. Systematic investigation of building energy efficiency standard and hot water preparation systems' influence on the heat load profile of districts / Isabelle Best, Hagen Braas, Janybek Orozaliev, Ulrike Jordan, Klaus Vajen // Energy. – 2020. – Vol. 197.

8. Lund, Henrik. 4th Generation District Heating (4GDH): integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems / Henrik Lund, Sven Werner, Robin Wiltshire, Svend Svendsen, Jan Eric Thorsen, Frede Hvelplund, Brian Vad Mathiesen // Energy. – 2014. – Vol. 68. – P. 1–11.

9. Juan de Santiago.The generation of domestic hot water load profiles in Swiss residential buildings through statistical predictions / Juan de Santiago, Rodriguez-Vialon Osvaldo, Sicre Benoit. // Energy and Buildings. – 2017. – Vol. 141. – P. 341–348.

10. Ivanko Dmytro. Splitting measurements of the total heat demand in a hotel into domestic hot water and space heating heat use / Ivanko Dmytro, Lekang Sørensen Åse, Nord Natasa. // Energy. – 2021. – Vol. 219.

11. Ferrari, Simone. Results of a literature review on methods for estimating buildings energy demand at district level / Simone Ferrari, Federica Zagarella, Paola Caputo, Antonino D'Amico // Energy. – 2019. – Vol. 175. – P. 1130–1137.

12. Emilio-José Sarabia-Escriva. Economic and environmental analysis of domestic hot water systems for single-family homes / Emilio-José Sarabia-Escriva, Víctor-Manuel Soto-Francés, José-Manuel Pinazo-Ojer, Salvador Acha.// Energy and Buildings. – 2023. – Vol. 286.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 721.057 DOI 10.54734/20722958_2024_3_175

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
Россия, Донецкая Народная Республика, 286123, г.о. Макеевский, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2
Бенаи Хафизулла Аминуллович,
доктор архитектуры, профессор
E-mail: kh.a.benai@donnasa.ru
Радионов Тимур Валерьевич,
кандидат архитектуры, доцент
E-mail: t.v.radionov@donnasa.ru
Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18
Сабитов Линар Салихзанович,
доктор технических наук, доцент, советник РААСН, лауреат Премии Правительства РФ
E-mail: sabitov- kgasu@mail.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28, тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77
Викторова Ольга Леонидовна,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и архитектура»

Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture
Russia, Donetsk People's Republic, 286123, city district. Makeevsky, Makeevka, 2, Derzhavina St.
Benai Hafizulla Aminullovich,
Doctor of Architecture, Professor
E-mail email: kh.a.benai@donnasa.ru
Radionov Timur Valerievich,
Candidate of Architecture, Associate Professor
E-mail: t.v.radionov@donnasa.ru
Kazan (Volga Region) Federal University
Russia, Kazan, 18, Kremlevskaya St.
Sabitov Linar Salikhzanovich,
Doctor of Sciences, Associate Professor, Advisor to RAASNE, Laureate of the Russian Government Prize
E-mail: sabitov- kgasu@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
Viktorova Olga Leonidovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Urban construction and architecture»

АРХИТЕКТУРА НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ

Х.А. Бенаи, Т.В. Радионов, Л.С. Сабитов, О.Л. Викторова

Выдвигается рабочая гипотеза о том, что архитектура научно-образовательных комплексов в современном научно-методологическом и практико-ориентированном понимании формируется стратегически в рамках решения важнейших государственных научных и образовательных задач. Анализируются достижения в области формирования объектов научной и образовательной сфер деятельности в ушедших эпохах (фундаментальный кластер развития архитектурных объектов нового поколения). Показывается, что динамика развития архитектуры зданий и сооружений научно-образовательных комплексов нового поколения основывается на стратегическом взаимодействии фундаментальных архитектурных разработок и прикладных технологических прогрессивных решений, которые при комплексном взаимодействии позволяют предоставлять современному обществу «генетически-пригодные» объекты архитектурно-градостроительной и строительной сферы деятельности в качестве «отличительно новых образцов

архитектурного здания и сооружения», пригодного для длительной функциональной эксплуатации.

Ключевые слова: динамическая архитектура, научно-образовательные комплексы, сооружения, стратегическое развитие, реконструкция, технологические подходы

ARCHITECTURE OF SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL COMPLEXES UNDER RECONSTRUCTION

Kh.A. Benai, T.V. Radionov, L.S. Sabitov, O.L. Viktorova

A working hypothesis that the architecture of scientific and educational complexes in modern scientific, methodological and practice-oriented understanding is formed strategically within the framework of solving the most important state scientific and educational tasks is put forwarc. In this regard, the conviction is put forward about the recognition of the highest achievements in the field of formation of objects of scientific and educational spheres of activity of bygone eras, which are a fundamental cluster for the development of architectural objects of a new generation, which in the modern sense are scientific and educational complexes implemented in conditions of reconstruction, including complex. It has been established that the dynamics of the development of the architecture of buildings and structures of new generation scientific and educational complexes is based on the strategic interaction of fundamental architectural developments and applied technological progressive solutions, which, with complex interaction, make it possible to provide modern society with "genetically suitable" objects of architectural, urban planning and construction activities as a "distinctive new example of architectural building and structure" suitable for lasting and functional suitability.

Keywords: dynamic architecture, buildings, scientific and educational complexes, new generation objects, structures, strategic development, reconstruction, technological approaches

Проблемное поле исследования. Полное освоение научной и образовательной «коммуникации» на современном этапе развития общества привело к тому, что в архитектуре возникла насущная потребность организации новой типологической группы объектов общественного назначения (*научно-образовательный комплекс*). В связи с этим, расширив функциональную сторону рассматриваемого типа объекта более предметно, можно раскрыть содержательно-информационную составляющую объектов подобного назначения, соединив это с потребностями государственного комплекса в области науки и образования, а также потребительским запросом общества. Уровень современной науки и образования, находящийся на стадии непрерывного развития, на сегодняшний день демонстрирует возможность и потребность в дальнейших научных и образовательных прорывах, направленных на разработку алгоритмов для решения важнейших народно-хозяйственных задач государства в различных отраслях науки и техники [1…3]. Исходя из этого в рамках исследования формулируется проблема, направленная на разработку и апробацию универсального *архитектурно-технологического алгоритма* проектирования научно-образовательных комплексов мирового уровня, основывающегося на поисковом проектировании с применением системы прикладного информационного моделирования (BIM-технологии) [4, 5]. Исследования основываются на применении новейших подходов, алгоритмов и мероприятий в области динамики архитектурно-технологического моделирования научно-образовательных комплексов в условиях реконструкции с полным спектром профессиональных компетенций фундаментального и прикладного характера [6]. Стратегия реконструктивных мероприятий исследуется с учетом *динамики использования* всех проектно-аналитических компонентов, присущих глобальному *процессу реконструкции*:

– *градостроительные компоненты* (проблемы размещения научно-образовательных комплексов в сложившихся городских условиях, проблемы *градостроительной реконструкции,* новый объект на ранее освоенной территории, которая потенциально граничит со сложившейся застройкой [7, 8]);

– *функционально-типологические* компоненты, определяющие необходимый состав помещений научно-образовательных комплексов и их типологическую структуру,

которая может быть реализована в условиях нового строительства, а также при реконструкции существующих (*действующих или выбывших из эксплуатации*) зданий и сооружений, в том числе комплексов;

– *архитектурно планировочные компоненты,* отвечающие «канонизированным» сложившимся и общепринятым критериям организации объектов рассматриваемого типа, но с учетом динамики глобального преобразования, совершенствования и развития архитектурных решений, в условиях комплексной реконструкции;

– *объемно-пространственные компоненты* (определяют уровень динамики формообразования, создания идейно-образных и эстетических символов застройки и всего проектируемого научно-образовательного комплекса);

– *конструктивно-технологические компоненты*, направленные на стратегическое обеспечение конструктивной надежности и устойчивости научно-образовательных комплексов (объектов повышенной категории сложности), при этом представленный компонент является важнейшим при реконструкции зданий и сооружений, потенциально пригодных для интеграции в них научной и образовательной функции; в рамках этого компонента решается стратегическая проблема технологической возможности применения реконструктивных мероприятий и целесообразности их проведения как с технической, так экономической точки зрения;

– *предметно-информационные компоненты*, основывающиеся на информационном обеспечении научно-образовательных комплексов с учетом современных вызовов общества о необходимости интеграции элементов цифровизации в объекты архитектуры; в условиях реализации этого компонента решаются проблемные вопросы связанные с возможностью размещения в объектах рассматриваемого типа медиацентров или кластеров.

Учитывая предметное изложение и подробную трактовку вышеприведенных компонентов, следует особо отметить, что при комплексной разработке проектно-исследовательских, в первую очередь практико-ориентированных предложений в области динамики архитектурно-технологического моделирования научно-образовательных комплексов (в том числе подобных объектов архитектуры мирового уровня), появляется возможность применения системы «*гибкой архитектурной динамики*», проявляющей свою суть на объемно-пространственном и конструктивно-технологическом уровнях, которые в свою основу включают способы отображения сложнейших геометрических форм зданий и сооружений научно-образовательных комплексов с учетом их своеобразной типологической структуры либо отдельных их составных частей с изменением габаритных размеров за счет перемещения несущих или изменения формы ограждающих конструкций в условиях комплексной, а также стратегической реконструкции объектов подобного назначения. За счет использования таких уникальных параметрических (наполненных элементами гибкой архитектурной динамики) решений появляется, а в отдельных случая проявляется прикладная возможность создания гибкой планировочной структуры в здании научно-образовательных комплексов. Отождествлением этого убеждения является тот факт, что в границах одного пространства происходит адаптация под конкретные задачи. Наличие перегородок в развернутом своем состоянии позволяют оформить раздельные аудитории, а в сложенном формируется просторное открытое пространство, ограниченное лишь несущими ограждающими конструкциями, что позволяет использовать его для массовых занятий и мероприятий. На основании этого можно говорить о рациональном перераспределении пространства как внутри разрабатываемого объекта архитектуры, так и в пределах его ближайшего градостроительного окружения, формируя тем самым систему пространственного развития территории.

Подтверждая с научной и практической точек зрения целесообразность создания научно-образовательных комплексов и прогнозируя динамику их развития, необходимо в первую очередь засвидетельствовать государственный механизм поддержки создания такого уровня комплексов, которые для всех отраслей науки и техники станут настоящими наукоградами, решающими важнейшие задачи народно-хозяйственной отрасли государства. В первую очередь стоит засвидетельствовать Постано-

вление Правительства «О мерах государственной поддержки научно-образовательных центров мирового уровня на основе интеграции образовательных организаций высшего образования и научных организаций и их кооперации с организациями, действующими в реальном секторе экономики», действующее в Российской Федерации с 2019 года [8, 9], – именно такой алгоритм позволяет уже на данном этапе стимулировать научные и практико-ориентированные предложения по взаимодействию всех отраслей науки и техники в едином механизме работы, которые в совокупности дают положительный эффект при их реализации. При этом возникает потребность в реализации комплексных мероприятий по созданию комплексных экспериментальных (практико-ориентированных) моделей научно-образовательных комплексов, интегрированных в сложившееся городское пространство, а значит, необходимо применять комплексные мероприятия по *реконструкции*.

Обогащая научный и практический смысл динамики развития научно-образовательных комплексов в условиях реконструкции, следует первичной и важнейшей задачей ставить *конструктивно-технологические компоненты*, предоставляющие фундаментальную платформу для продвижения и реализации дальнейших архитектурных и градостроительных решений объектов рассматриваемого типа.

В качестве объективно-приемлемого алгоритма перед проведением проектных разработок, связанных с реконструктивными мероприятиями для зданий и сооружений рассматриваемого типа, относящихся к объектам повышенной категории сложности, авторы статьи рекомендуют проводить комплексное обследование, заключающееся в выполнении следующих этапов:

– *изучение архивных документов*, на основании которых составляется историческая справка на градостроительный участок и объекты, если таковые присутствуют в наличии на заданной территории, подлежащей обследованию;

– *получение данных о геологии и гидрогеологии участка застройки* (по мере необходимости) в зависимости от степени сложности горно-геологических условий участка реконструкции;

– *ознакомление с инвентаризационными планами зданий и сооружений*;

– *установление функционального состава и назначения помещений*, если в структуре присутствуют действующие объекты архитектуры или выбывшие;

– *инструментальное обследование конструктивных элементов зданий и сооружений*, а также определение их эксплуатационных качеств (в соответствии с заданием на проектирование);

– *выработка комплексных (вариативных) предложений* по решению генерального плана участка, этажности и габаритам здания;

– *разработка вариантов архитектурно-планировочных предложений* по реконструкции зданий и сооружений и интеграции новых функционально-типологических групп объектов общественного назначения [10…12];

– *разработка технико-экономического обоснования* принятых проектных решений для условий реконструкции.

Строгое соблюдение всех нормативно-правовых и законодательных требований, предъявляемых к объектам архитектуры и прилегающим к ним территориям, участвующим в реконструктивных мероприятиях, позволяет вырабатывать отличительно-новые архитектурные решения.

В качестве практико-ориентированного подтверждения вышеизложенных научных предложений и рассуждений о динамике развития архитектуры научно-образовательных комплексов в условиях реконструкции авторы статьи приводят разработанный экспериментальный проект научно-образовательного центра интегрированного типа в структуре ФГБОУ ВО «ДОННАСА (рис. 1–8)». Проектное предложение основывается на приоритетных задачах в первую очередь градостроительной реконструкции, поскольку проектная типологическая группа зданий и сооружений, из которых состоит весь комплекс, располагается, по авторскому замыслу, на территории академии. В рамках проектной модели заложены основы динамического развития участка застройки и архитектурно-планировочная динамика всех групп зданий и

сооружений, которые обеспечены конструктивной надежностью и долговечностью, по отношению к применяемым строительным материалам.

Рис. 1. Схема генерального плана научно-образовательного комплекса, интегрированного в структуру ФГБОУ ВО «ДОННАСА»

Рис. 2. Функциональная структура научно-образовательного комплекса: параметрическая схема

Рис. 3. Объемно-пространственное решение научно-образовательного комплекса, интегрированного в структуру ФГБОУ ВО «ДОННАСА»

Рис. 4. Объемно-пространственное решение научно-образовательного комплекса, интегрированного в структуру ФГБОУ ВО «ДОННАСА»

Рис. 5. Фрагмент входа в административный корпус научно-образовательного комплекса

Рис. 6. Укрупненный фрагмент дополнительного входа в административный корпус научно-образовательного комплекса

Рис. 7. Фрагмент организации внутреннего двора научно-образовательного комплекса

Рис. 8. Фрагмент организации зоны отдыха в пределах прилегающей территории научно-образовательного комплекса

Рис. 9. Фрагмент благоустройства прилегающей территории научно-образовательного комплекса

Выводы

1. Предложен практико-ориентированный алгоритм архитектурного моделирования научно-образовательных комплексов на стадии разработки проектной документации.
2. Фундаментальне научные и практико-ориентированные подходы, раскрывающие процесс динамики развития архитектуры научно-образовательных комплексов, основываются на технологических приоритетах в условиях реконструкции и на стратегических прогрессивных предложениях.
3. Процесс развития архитектуры научно-образовательных комплексов и алгоритм разработки проектной документации предполагает поисковое проектирование в условиях реконструкции в рамках комплексной научной аналитики.

Список литературы

1. Гельфонд, А.Л. Архитектурная типология общественных зданий и сооружений / А.Л. Гельфонд; Нижегор. Гос. архитектур.-строит. унт. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2003. – 201 с.

2. Попов, А.О. Системный подход к анализу технического состояния объектов культурного наследия на примере корпуса «ОРЕШЕК» Шлиссельбургской крепости / А.О. Попов, Л.Р. Маилян, Л.С. Сабитов, А.М. Данилов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4 (57). – С. 199–205.

3. Селютина, Л.Ф. Анализ состояния и возможностей сохранения объекта культурного наследия в Повенце / Л.Ф. Селютина, Е.И. Ратькова, А.А. Корнеев // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 1(54). – С. 186–195.

4. Саденко, Д.С. Виброметрические методы диагностики строительных конструкций / Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин, Л.Р. Маилян, Л.С. Сабитов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15, № 3 (59). – С. 175–189.

5. Мирхасанов, Р.Ф. Композиционная форма в архитектуре конца XIX века: эволюция инженерной мысли / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2(55). – С. 157–161.

6. Лапшина, Е.Г. Динамическая архитектура в пространстве современного города / Е.Г. Лапшина, Я.И. Сухов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2(43). – С. 171–177.

7. Лапшина, Е.Г. Концепция архитектурного пространства городов: динамическая составляющая / Е.Г. Лапшина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 170–176.

8. Каракова, Т.В. Художественная перфорация как инструмент формообразвания архитектуры общественного здания в контексте эмерджентности системы / Т.В. Каракова, А.В. Данилова // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 211–219.

9. Бенаи, Х.А. Совершенствование архитектурно-градостроительной типологии зданий и сооружений, подлежащих реконструкции / Х.А. Бенаи, Т.В. Радионов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2019. – №2(136) – С. 9–14.

10. Маренков, К.А. Современные технологические подходы в области архитектурной организации научно-образовательных центров / К.А. Маренков // Градостроительство и архитектура – 2023. – С. 156–159.

11. Скачков, Ю.П. Модификация метода ПАТТЕРН к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. –2011. – № 1. – С. 4–9.

12. Пучков, М.В. Принципы проектирования научно-образовательных центров нового поколения: архитектура современных технологий обучения / М.В. Пучков // Академия – 2011. – № 2. – С. 48–51.

References

1. Gelfond, A.L. Architectural typology of public buildings and structures / A.L. Gelfond; Nizhegorsk State architecture – builds unt. – N. Novgorod: NNGASU, 2003. – 201 p.

2. Popov, A.O. A systematic approach to the analysis of the technical condition of cultural heritage objects using the example of the “ORESHEK” building of the Shlisselburg Fortress / A.O. Popov, L.R. Mailyan, L.S. Sabitov, A.M. Danilov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 4 (57). – P. 199–205.

3. Selyutina, L.F. Analysis of the state and possibilities of preserving a cultural heritage site in Povenets / L.F. Selyutina, E.I. Ratkova, A.A. Korneev // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 1(54). – P. 186–195.

4. Sadenko, D.S. Vibrometric methods for diagnosing building structures / D.S. Sadenko, I.N. Garkin, L.R. Mailyan, L.S. Sabitov // Bulletin of the Kazan State Energy University. – 2023. – T. 15, No. 3 (59). – P. 175–189.

5. Mirkhasanov, R.F. Compositional form in the architecture of the late 19th century: the evolution of engineering thought / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 2(55). – P. 157–161.

6. Lapshina, E.G. Dynamic architecture in the space of a modern city / E.G. Lapshina, Ya.I. Sukhov // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 2(43). – P. 171–177.

7. Lapshina, E.G. The concept of urban architectural space: dynamic component / E.G. Lapshina // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 4 (53). – P. 170–176.

8. Karakova, T.V. Artistic perforation as a tool for shaping the architecture of a public building in the context of system emergence / T.V. Karakova, A.V. Danilova // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1 (46). – P. 211–219.

9. Benai, Kh. A. Improvement of architectural and urban planning typology of buildings and structures subject to reconstruction / Kh. A. Benai, T. V. Radionov // Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. – 2019. – Issue 2019-2(136). – P. 9–14.

10. Marenkov, K.A. Modern technological approaches in the field of architectural organization of scientific and educational centers / K.A. Marenkov // Scientific and technical journal “Urban planning and architecture” – 2023. – P. 156–159.

11. Skachkov, Yu.P. Modification of the PATTERN method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and construction. – 2011. – No. 1. – P. 4–9.

12. Puchkov, M.V. Principles of designing scientific and educational centers of a new generation: architecture of modern educational technologies / M.V. Puchkov // Academy. – 2011. – No. 2. – P. 48–51.

УДК 697.7 DOI 10.54734/20722958_2024_3_184

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

ОБОГРЕВ ПОДЗЕМНЫХ И ЗАГЛУБЛЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ТЕПЛОМ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЗЕМЛИ

А.М. Береговой

Выполнен анализ влияния на экономию тепловой энергии формообразования заглубленных частей зданий, а также способов использования рассеянной энергии природной среды. Дана оценка зависимости эффективности использования тепла различных источников энергии от коэффициента компактности и геометрических параметров подземных помещений. Показано, что эффективность использования тепла верхних слоев земли понижается с ростом размеров подземного пространства и с уменьшением коэффициента компактности последнего. Установлено, что в подземном пространстве наибольшее влияние на увеличение эффективности использования тепла земли оказывает его высота. Дана оценка энергосберегающему эффекту в заглубленном пространстве на примере отрытого в земле и обогреваемого убежища с воздуховодом, уложенным на дно засыпанной траншеи.

Ключевые слова: обогрев помещений, коэффициент компактности, энергосбережение, тепло земли, подземные помещения, заглубленные помещения

HEATING OF UNDERGROUND AND BURIED ROOMS WITH THE HEAT OF THE UPPER LAYER OF THE EARTH

A.M. Beregovoy

The analysis is carried out of the influence of the shaping of buildings buried parts on the saving of thermal energy, as well as of ways of using the scattered energy of the natural environment. The dependence of the heat use efficiency of various energy sources on the compactness coefficient and geometric parameters of underground spaces is estimated. It is shown, that the efficiency of using the heat of the upper layers of the earth decreases with an increase in the size of the underground space and with a decrease in the compactness coefficient of the latter. It is found, that the height of underground space has the greatest influence on the growth of the efficiency of using the heat of the earth upper layers. An assessment of the energy–saving effect in the buried space is given by the example of a dug in the ground and heated shelter with an air duct, laid at the bottom of a filled trench.

Keywords: space heating, compactness coefficient, energy saving, earth heat, underground rooms, buried rooms

Вступивший в силу с 1 марта 2023 г. ГОСТ Р 42.4.16-2023 «Приспособление заглубленных помещений для укрытия населения» относит к заглубленным помещениям подвалы жилых домов с отметкой верха перекрытия, расположенного ниже планируемой отметки земли, подземные горные выработки, транспортные тоннели, подземные переходы, подземное пространство метрополитена.

Необходимость выхода в свет данного ГОСТ'а объясняется заметным отставанием отечественного строительства подземных помещений данного рода от мирового опыта. (Например, размещение всей инфраструктуры и транспорта под землей в г. Монреале, подземный город РАТН в Канаде , проектирование всей транспортной сети под землей в Китае.)

В России имеются подземные парковки и тоннели, построенные во всех крупных городах, а в большинстве жилых домов есть подвальные помещения, которые используются для бытовых нужд и в которых располагаются системы тепло- и водоснабжения. При этом обогрев многих убежищ, в том числе отрытых в отдалении от зданий, представляет определенные трудности из-за сложности применения упомянутых систем жизнеобеспечения. Поэтому очевидна актуальность использования возобновляемых источников энергии для улучшения теплового режима таких углубленных пространств. Заглубление в земляной массив всего здания или его части является в архитектурно-строительном проектировании одним из способов экономии тепловой энергии.

Проблеме потери тепловой энергии подземных сооружений и использования тепла земли для их обогрева с помощью технических устройств посвящены работы ряда авторов [1–3]. При этом следует иметь в виду, что применение таких устройств, как тепловые насосы, требует тщательного технико–экономического обоснования и дорогостоящего оборудования.

Выполненный анализ вариантов заглубления таких зданий показал, что на экономию тепловой энергии оказывают влияние следующие факторы: теплофизические свойства окружающего земляного массива; климат местности; ориентация надземной части и степень заглубления подземной; геометрические размеры заглубленного пространства; способы его вентиляции; способы использования тепла рассеянной энергии природной среды. Влияние последних трех факторов на тепловую эффективность заглубленных зданий и сооружений, которое представляется недостаточно изученным, и входит в задачу настоящего исследования.

Теплофизические свойства земляного массива зависят от показателей его теплоемкости и теплопроводности, на которые влияет целый ряд факторов. Так, удельная теплоемкость суглинка в сухом состоянии и в условиях эксплуатации в 1,14 и 1,26 раза может превосходить соответствующие показатели у супеси. В условиях низких температур она по сравнению с сильно нагретым грунтом может уменьшиться на 10...15 %. Объемная теплоемкость, связанная с теплоаккумулирующими свойствами грунта и коэффициентом его теплопроводности, влияет на теплообмен грунтового массива с подземными ограждающими конструкциями здания. Теплопроводность грунта снижается с уменьшением его влажности или при наличии в его составе мелкозернистых компонентов. Так, например, теплопроводность песка становится меньше примерно в 2 раза при потере его влажности на 20 %. От климата местности зависят количество тепла солнечной радиации, попадающего на поверхность земли и аккумулированного земляным массивом, а также глубина промерзания грунта, окружающего заглубленное здание или сооружение.

Для улучшения методики проектирования таких объектов выполнен анализ особенностей влияния геометрических параметров на тепловую эффективность энергоэкономичных и энергоактивных зданий. Для энергоэкономичных зданий она возрастает с увеличением их размеров, особенно ширины корпуса. Для энергоактивных тепло солнечной радиации более эффективно используется в узкокорпусных зданиях. Как показали результаты выполненного расчета, особенно заметно это проявляется в зданиях с высотой этажа 3 м при их ширине менее 12 м. С точки зрения формообразования у энергоактивных зданий отношение тепловоспринимающих поверхностей (наружной оболочки) $S^{огр}$ к объему V больше, чем у энергоэкономичных зданий.

В отличие от заглубленных частей здания, воспринимающих тепло земляного массива одновременно с нескольких направлений, для его надземной части в процессе инсоляции основное количество тепла к наружным ограждениям поступает только с одной стороны горизонта (в северном полушарии – с южной). Поскольку для

энергоактивных зданий и сооружений наружные ограждения рассматриваются, скорее, как тепловоспринимающие, а не как теплоотдающие конструкции, то и уменьшение коэффициента компактности подземного пространства здания снижает его тепловую эффективность.

Зависимость эффективности использования тепла различных источников энергии от коэффициента компактности здания или подземного помещения ($K = S^{огр}/V$) показана в табл. 1. Оценку взаимосвязи геометрических параметров подземного пространства зданий и теплопоступлений со стороны грунта производили при условии равенства между собой термических сопротивлений всех наружных ограждений подземного пространства, теплопоступлений через цокольное перекрытие (последние в расчете не учитывались), теплопоступлений со стороны грунта. Результаты расчета приведены в табл.2.

Таблица 1

Эффективность использования тепла концентрированных $F_т$ и возобновляемых $F_с$ и $F_з$ источников энергии для различных зданий и подземных помещений в зависимости от отношения $S^{огр}/V$

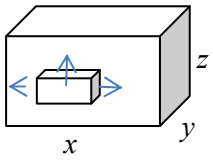
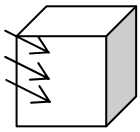
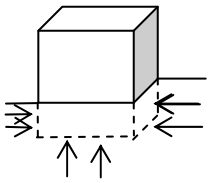
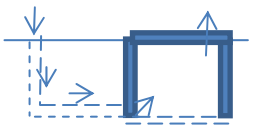
Здания с традиционной системой отопления	Здания с использованием тепла солнечной радиации	Здания с использованием тепла верхних слоев земли	Заглубленное убежище
			
$F_т = f(V/S^{огр})$	$F_с = f(S^{огр}/V)$	$F_з = f(K)$	$F_з = f(K)$

Таблица 2

Зависимость коэффициента компактности подземного пространства $K_п = S^{огр}/V$ и отношения $S^{огр}/S_п$ от его геометрических параметров

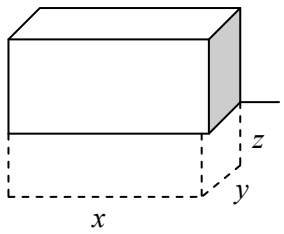


Схема подземного пространства

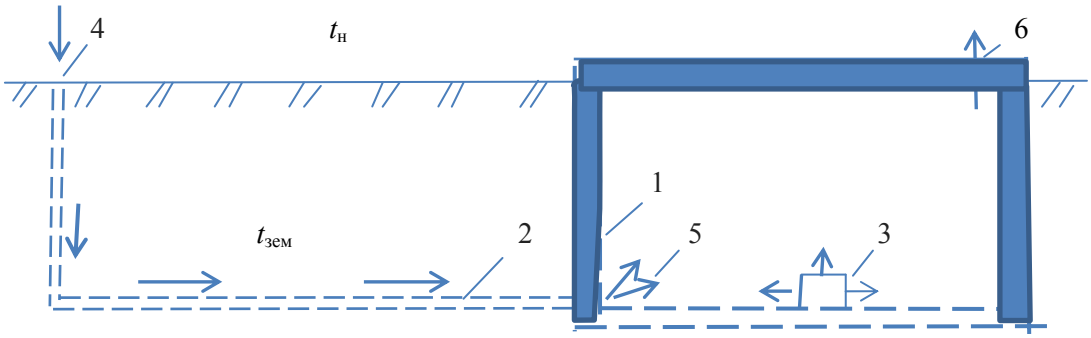
$S^{огр}$ – площадь граней
V – объем подземного пространства
$S_п$ – площадь пола подземного пространства

Неизменяемые параметры	x	y	z	$K = S^{огр}/V$	$S^{огр}/S_п$
$y = 50$ $z = 2,5$	10 14 22			0,64 0,58 0,53	1,60 1,46 1,33
$x = 10$ $z = 2,5$		30 50 90		0,67 0,64 0,62	1,67 1,60 1,56
$x = 10$ $y = 50$			2 2,5 3	0,74 0,64 0,57	1,48 1,60 1,72

Результаты расчета, приведенные в табл. 2, показали, что увеличение отношения $K=S^{огр}/V$ подземного пространства повышает эффективность использования тепла

верхних слоев земли $Q_{эф}$. Последняя величина уменьшается с увеличением размеров подземного пространства, что особенно заметно с ростом вертикального размера z.

Основываясь на результатах натурного эксперимента, проведенного в заглубленной части здания, и расчетного моделирования [4], составили модель отрытого в земле убежища, приспособленного для использования тепла земляного массива. Стены и покрытие убежища имеют теплоизоляцию, а к нему с одной или двух сторон подведены воздуховоды с воздухозаборниками на поверхности земли. Воздуховод, уложенный на дно засыпанной траншеи в защитном коробе, изготовлен из прочной полимерной пленки с наружным проволочным каркасом по аналогии с принятой конструкцией в проведенном ранее эксперименте. Циркуляция воздуха в воздуховоде осуществляется с помощью маломощного вентилятора, а выход воздуха – через верхнее вытяжное отверстие убежища (см. рисунок).



Убежище, использующее тепло земляного массива:
1 – наружное ограждение с теплоизоляцией; 2 – воздуховод; 3 – источник тепла;
4 – воздухозаборник; 5 – приток воздуха в помещение; 6 – вытяжка воздуха из помещения

При поступлении в подземное помещение воздуха, подогретого земляным массивом, возникает эффект экономии тепла $Q_{эф}$ за счет уменьшения регулируемого объема холодного вентиляционного воздуха через приточное традиционное отверстие. Температуру t_x,°С, нагреваемого воздуха в сечении x воздуховода можно найти по известной формуле, использованной в [4], для расчета среднесуточной температуры воздушной прослойки ограждающих конструкций:

$$t_x = t_c - (t_c - t_н) \cdot e^{-Ax}. \quad (1)$$

Величина $Q_{эф}$ определяется за счет разницы тепловой энергии на подогрев объема воздуха, поступающего из воздуховода, до требуемой температуры воздуха убежища и на подогрев такого же объема холодного приточного воздуха в соответствии с формулой

$$Q = 0{,}28 \cdot W_{вент} \cdot \gamma_н \cdot c_в \cdot (t_в - t_н), \quad (2)$$

где $W_{вент}$ – расход воздуха в воздуховоде, кг/ч; $t_в$ и $t_н$ – температура внутреннего и наружного воздуха, °С; $c_в$ – удельная теплоемкость воздуха, равная 1,005 кДж/ (кг·°С); $W_{вент}$ = 3600 $V_в \cdot \rho_в \cdot F \cdot c_в$ ($V_в$, $\rho_в$, F – соответственно скорость, м/с, плотность, кг/м^3, воздуха в воздуховоде и сечение воздуховода, м^2).

Некоторое представление об эффекте энергосбережения для рассмотренного подземного укрытия можно составить, задавшись исходными данными, принятыми в вышеупомянутом натурном эксперименте (температура воздуха, сечение и длина воздуховода, площадь обогреваемого помещения). Тогда, например, можно предположить, что экономия тепловой энергии для рассмотренного подземного укрытия, имеющего площадь 11 м^2, может приблизиться к величине 48 % при температурах земли на дне траншеи $t_{зем}$ = +9°С, наружного воздуха $t_н$ = – 6 °С, длине воздуховода 11 м, его сечении 11 см и скорости движения воздуха в воздуховоде 1 м/с.

Более точно оценить значение $Q_{эф}$ позволит проведение эксперимента в натурных условиях.

Таким образом, эффективность использования тепла верхних слоев земли повышается при увеличении отношения суммарной площади тепловоспринимающих поверхностей к объему подземного пространства, причем наиболее заметно с уменьшением его высоты. Энергосбережение в обогреваемом подземном убежище можно повысить при использовании воздуховода, уложенного на дно засыпанной траншеи, за счет уменьшения объема холодного воздуха, поступающего через традиционное приточное отверстие.

Список литературы

1. Стетюха, В.А. Эффективность использования подземного пространства в суровых климатических условиях / В.А. Стетюха // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2022.– Т. 28, №8. – С. 6–17.

2. Бердыбаева, М.Т. Энергоэффективные технологии в теплоснабжении зданий с использованием тепловых насосов. Опыт Киргизии / М.Т. Бердыбаева, Э. Байышов // Энергосбережение. – 2020. – № 5. – С.54–57.

3. Бутузов, В.А. Геотермальная энергетика Германии / В.А. Бутузов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2020. – № 6. – С.18–23.

4. Береговой, А.М. Использование тепла подземных помещений в энергосбережении / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №1. – С. 85–89.

Reference

1. Stetyukha, V.A. Efficiency of underground space use in harsh climatic conditions // Bulletin of the Trans–Baikal State University. – 2022 – Vol.28, №8.. – P. 6–17.

2. Berdybaeva, M.T. Energy-efficient technologies in the heat supply of buildings using heat pumps. Kyrgyzstan's experience / M.T. Berdybaeva, E. Bayyshov // Energy saving. – 2020. – № 5. – P.54–57.

3. Butuzov, V.A. Geothermal energy of Germany / V.A. Butuzov // Energy safety and energy saving. – 2020. – №6. – P.18–23.

4. Beregovoy, A.M. Using of underground rooms heat in energy saving / A.M. Beregovoy, M.A. Derina // Regional architecture and engineering. – 2016. – №1. – P. 85–89.

УДК 69.059.7:728 DOI 10.54734/20722958_2024_3_189

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

Дерина Мария Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Городское строительство и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Петрянина Любовь Николаевна,
доцент кафедры «Городское строительство и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Рахимов Фирдавс Абдурашидович,
магистрант
E-mail: gsia@pguas.ru

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

Derina Maria Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Urban construction and Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Petryanina Lyubov Nikolaevna,
Associate Professor of the Department «Urban construction and Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Rakhimov Firdavs Abdurashidovich,
Master student
E-mail: gsia@pguas.ru

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ: ВОЗДУШНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ В ПОМЕЩЕНИИ

М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, Ф.А. Рахимов

Проведены исследования эффективности мероприятий по снижению потребления энергоресурсов при реконструкции жилых зданий и эксплуатационных затрат на отопление объекта. Определены устройства, повышающие эффективность использования тепловой энергии для малоинерционных построек, в том числе перекрестноточный рекуператор для проверки вентиляционной установки в реконструируемом помещении с целью поддержания нормативных показателей микроклимата. Предложена оценка применения рекуперативной вентиляции, позволяющая определить значения экономии энергоресурсов на стадии проектирования. Сделан вывод о целесообразности использования энергосберегающей технологии, позволяющей снизить затраты на отопление при реконструкции жилых зданий.

Ключевые слова: жилые здания, ресурсосберегающие технологии, реконструкция, микроклимат помещений, тепловая энергия, рекуператор, эксплуатационные затраты, эффективность рекуперации

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES IN THE RECONSTRUCTION OF RESIDENTIAL BUILDINGS: INDOOR AIR CIRCULATION

M.A. Derina, L.N. Petryanina, F.A. Rakhimov

Some research has been conducted to reduce energy consumption during the reconstruction of residential buildings and to obtain the effect of reducing the operating costs of heating the facility. Devices that increase the efficiency of using thermal energy for low-inertia buildings have been identified, among them a cross-flow heat exchanger to check the ventilation system in the reconstructed room in order to maintain the normative indicators of the microclimate. An assessment of the use of regenerative ventilation is proposed, which makes it possible to determine the values of energy savings at the design stage. It is concluded that it is advisable to use energy-saving technology to reduce heating costs during the reconstruction of residential buildings.

Keywords: residential buildings, resource-saving technologies, reconstruction, indoor microclimate, thermal energy, recuperator, operating costs, recovery efficiency

Потенциал в сфере энергосбережения с использованием передовых технологий несмотря на приоритетное направление государственной энергетической политики сегодня сдерживается недостаточностью инвестиций, эффективных мер по их привлечению, ограниченностью мотивации по повышению энергоэффективности потребителей энергии.

К мероприятиям, которые могут изменить управление и функционирование энергетических систем, относятся энергоэффективные технологии, используемые при реконструкции существующих жилых зданий.

Снижение расходов на отопление реконструируемых жилых зданий для проживающих в них может быть получено с помощью различных инструментов, поэтому вопросы поиска способов повышения энергоэффективности жилья наиболее актуальны в области эксплуатации объектов жилищно-коммунального комплекса [1].

В связи с этим были выполнены исследования с использованием мероприятий по снижению уровня потребления энергоресурсов при реконструкции (пристрой дополнительного объема к существующему жилому зданию) в соответствии с действующими нормативными требованиями и получен эффект снижения эксплуатационных затрат на отопление объекта.

В настоящее время наблюдается тенденция сокращения энергозатрат на основе внедрения устройств и технологий использования вторичных ресурсов. Установлено, что оборудованием, повышающим эффективное использование тепловой энергии, является устройство рекуператора воздуха – специальной конструкции теплообменника, совмещенной с вентиляционной системой (рис. 1) [2].

Работа вентиляционной системы тепловой рекуперации характерна тем, что в одну ее часть нагнетается наружный воздух, а из другой выводится из помещения внутренний воздух. Происходит теплообмен между потоками внутри рекуператора (рис. 2). При этом в холодное время года воздух, направленный из помещения, нагревает приточные воздушные массы, а в теплый период – наоборот, охлаждает их [3]. Таким образом, при использовании рекуператора в условиях реновации жилых зданий:

– значительно снижаются нагрузки на системы кондиционирования и отопления внутреннего воздуха;

– поддерживаются показатели микроклимата помещения на комфортном уровне;

– снижаются расходы на электрическую энергию.

Однако мероприятий по применению рекуперативных воздухонагревателей, позволяющих передавать тепло от внутреннего к приточному воздуху, недостаточно.

Было определено, что целесообразно применение рекуператора теплообмена в зданиях с принудительным отводом воздуха, которыми являются малоинерционные постройки, возводимые с использованием инновационных приемов теплоизоляции ограждающих конструкций (сэндвич-панели, газосиликатные блоки) [4]. Подобные приемы, позволяющие сократить материалоемкость и сроки строительства, целесообразно применять при реконструкции зданий, т.к. в подобных объектах стены аккумулируют тепло недостаточно, а естественный воздухообмен малоэффективен [5].

Известно, что рекуператоры различаются:

– по схеме движения приточного и удаляемого воздуха: прямоточные, противоточные, перекрестноточные и др;

– по конструкции: пластинчатые, роторные, трубчатые, ребристые и т. п.

Проблемы с воздушной циркуляцией характерны также для зданий с наружными стенами, выполняемыми из кирпича и бетона. Герметично закрывающиеся тепло- и звукоизоляционные ПВХ-конструкции окон, часто используемые для заполнения проемов при реконструкции, блокируют циркуляцию с естественным побуждением, из-за чего приток наружного воздуха прекращается, а вытяжка в вентиляционном канале стремится к нулю или опрокидывается (дискомфортное состояние микроклимата).

① Забор холодного воздуха
② Рекуператор (теплообменник, фильтр, приточный и вытяжной вентиляторы, подогрев)
③ Воздуховод
④ Диффузор, через который подается подогретый свежий воздух
⑤ Вентиляционная решетка для забора загрязненного воздуха
⑥ Выброс загрязненного воздуха

Рис. 1. Схема воздушной циркуляции в помещении

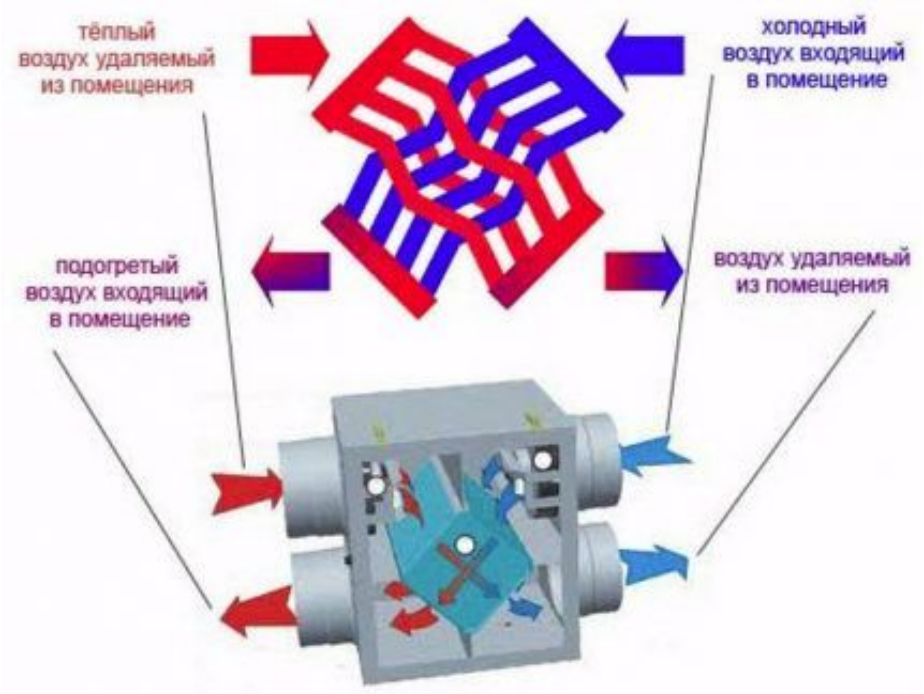


Рис. 2. Схема устройства рекуператора для теплообмена

Как показали исследования, решением проблемы применения ПВХ-конструкций окон может быть устройство принудительной вентиляции, позволяющей восстановить нормальный воздухообмен [6]. Здесь увеличение теплопотерь возможно до 60 %, что подтверждает целесообразность использования рекуператора.

Для проверки эффективности вентиляционной установки был использован перекрестноточный рекуператор. Все элементы системы расположены в общем корпусе: рекуператор, нагреватель для подогрева приточного воздуха, фильтры для очистки воздуха, жалюзи.

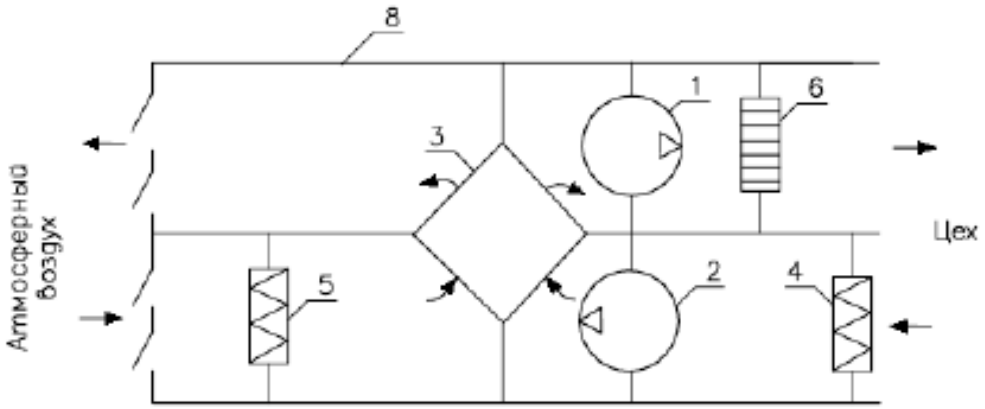


Рис. 3. Схема вентиляционной системы с рекуператором:
1 – вентилятор приточный; 2 – вентилятор вытяжной; 3 – рекуператор; 4, 5 – фильтры;
6 – нагреватель; 7 – жалюзи; 8 – корпус установки

В результате использования рекуператора было установлено, что эффективность рекуперации тепла при различных вариантах реконструкции объемно-планировочного решения может иметь следующие значения:

– 100 %, когда приточный воздух может разогреться до «отработанной» температуры, что технически невозможно;

– 25–90 % при эффективности 55 % и более – рекуперация хорошая, при значениях более 85 % – отличная;

– 0 %, когда внутренний теплый поток воздуха удаляется, а наружный холодный, попадая в помещение при открытых оконных проемах, понижает его температуру.

Также было установлено, что эффективность описанной системы будет зависеть от объема помещения, выбора рекуператора и расхода воздуха. Однако используя рекуперационную вентиляцию даже с минимальной эффективностью (25 %), можно улучшить показатели микроклимата помещения, регенерируя тепло, и заметно экономить энергоресурсы [7].

При определении потерь тепла в пристраиваемых объемах было предположено, что система вентиляции будет работать в холодный период года при температуре приточного воздуха $T_{пр}$ = -22^0 С и удаляемого воздуха $T_{уд}$=20^0 С. При этом значения удельной энергии удаляемого $e_{уд}$ и приточного $e_{пр}$ воздуха, проходящего в единицу времени через «живое сечение», были определены по формулам

$$e_{пр} = L_{пр} \cdot c_{пр} \cdot T_{пр}; \quad (1)$$

$$e_{уд} = L_{уд} \cdot c_{уд} \cdot T_{уд}, \quad (2)$$

где $c_{пр}$ и $c_{уд}$ – средние удельные теплоемкости приточного и удаляемого воздуха при постоянном давлении.

Было принято, что давление при подаче и удалении воздуха практически не меняется, поэтому при расчетах использовались средние удельные теплоемкости приточного и удаляемого воздуха при постоянном давлении.

По формулам (1) и (2) определена внутренняя удельная энергия приточных $e_{пр.рк}$ и удаляемых $e_{уд.рк}$ воздушных масс при использовании рекуператора. Подставив необходимые значения, было получено:

$$e_{пр.рк}=5{,}0\cdot10^{6}\ Дж/с \approx 1{,}2\cdot10^{-3}\ Гкал/с;$$

$$e_{уд.рк}=4{,}82\cdot10^{6}\ Дж/с \approx 1{,}15\cdot10^{-3}\ Гкал/с.$$

Тогда $$\Delta e_{рк}=e_{уд.рк}-e_{пр.рк}=0{,}05\cdot10^{-3}\ Гкал/с.$$

За 8 часов ($29{,}8\cdot10^{3}$ с) при непрерывно работающей рекуперативной вентиляции выброс составит $\Delta e_{рк}=1{,}44$ Гкал, т.е. теплопотери будут в 2 раза меньше, чем без рекуператора.

В процессе исследования были выявлены недостатки рекуператора: энергозависимость, образование конденсата, шумность [8].

Однако внедрение рекуперационной вентиляции при реновации жилых зданий:

– полностью заместит естественное проветривание помещений, т.к. непрерывно работающая вентиляционная система позволит нормализовать показатели микроклимата помещения (нормализовать влажность воздуха, удалить углекислый газ и запахи);

– обеспечит очистку свежего воздуха в помещении, а также защиту от загрязнения вентиляционного оборудования с помощью фильтра;

– уменьшит затраты на отопление и кондиционирование внутреннего воздуха реконструируемых жилых зданий на 25-55 % при сокращении отопительного периода за счет использования потока тепла, выходящего из помещения;

– позволит использовать недорогие комплектующие и в целом будет иметь малозатратное простое ресурсное обслуживание.

Поэтому эффективность применения рекуперативной вентиляции была оценена сопоставлением её достоинств и недостатков [9].

Вывод. Использованная авторами модель воздушной циркуляции в помещении при разработке энергосберегающей технологии позволяет снизить затраты на обогрев мест общего пользования в зданиях жилого назначения при реконструкции.

Список литературы

1. Абрамян, С.Г. Реконструкция зданий и сооружений: основные проблемы и направления / С.Г. Абрамян // Инженерный вестник Дона. – 2016. – №4. – С.1–9.

2. Ахмяров, Т.А. Система активного энергосбережения с рекуперацией тепла / Т.А. Ахмяров, В.С. Беляев, А.В. Спиридонов, И.Л. Шубин // Энергосбережение. – 2013. – №4. – С. 36–46.

3. Ахмяров, Т.А. Энергоэффективные вентилируемые ограждающие конструкции с активной рекуперацией выходящего теплового потока / Т.А. Ахмяров, А.В. Спиридонов, И.Л. Шубин // Жилищное строительство. – 2014. – №10. – С. 38–42.

4. Спиридонов, А.В. Перспективы применения технологий и систем активного энергосбережения, энергоэффективных вентилируемых ограждающих конструкций при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте жилых и общественных зданий / А.В. Спиридонов, И.Л. Шубин // Энергосбережение. – 2014. – №3. – С. 27–36.

5. Шубин, И.Л. Проблемы энергосбережения в российской строительной отрасли / И.Л. Шубин, А.В. Спиридонов // Энергосбережение. – 2013. – №1. – С. 15–21.

6. Дерина, М.А. Сравнительный анализ технико-экономических показателей проектных решений жилых и общественных зданий / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, М.А. Чупряков // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №1. – С.75–79.

7. Дерина, М.А. Архитектурно-строительное проектирование: проблемы оценки качества / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2. – С.75–79.

8. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, Ю.С. Сергунина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №1(42). – С.212–217.

9. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.203–208.

References

1. Abrahamyan, S.G. Reconstruction of buildings and structures: the main problems and directions / S.G. Abrahamyan // Engineering Bulletin of the Don. – 2016. – No.4. – P.1–9.

2. Akhmyarov, T.A. Active energy saving system with heat recovery / T.A. Akhmyarov, V.S. Belyaev, A.V. Spiridonov, I.L. Shubin // Energy saving. – 2013. – No. 4. – P. 36–46.

3. Akhmyarov, T.A. Energy-efficient ventilated enclosing structures with active recovery of the outgoing heat flow / T.A. Akhmyarov, A.V. Spiridonov, I.L. Shubin // Housing construction. – 2014. – No.10. – P. 38–42.

4. Spiridonov, A.V. Prospects for the application of technologies and systems of active energy saving, energy-efficient ventilated enclosing structures in the construction, reconstruction and overhaul of residential and public buildings / A.V. Spiridonov, I.L. Shubin // Energy saving. – 2014. – No.3. – P. 27–36.

5. Shubin, I.L. Problems of energy saving in the Russian construction industry / I.L. Shubin, A.V. Spiridonov // Energy Saving. – 2013. – No.1. – P. 15–21.

6. Derina, M.A. Comparative analysis of technical and economic indicators of design solutions for residential and public buildings / M.A. Derina, L.N. Petryanina, M.A. Chupryakov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1. – P.75–79.

7. Derina, M.A. Architectural and construction design: problems of quality assessment / M.A. Derina, L.N. Petryanina, O.L. Viktorova // Regional architecture and engineering. – 2022. – No.2. – P.75–79.

8. Petryanina, L.N. The concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina, M.A. Derina, Y.S. Sergunina // Regional architecture and engineering. – 2020. – No.1(42). – P.212–217.

9. Petryanina, L.N. The concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2019. – No.1(38). – P.203–208.

УДК 692:167:168 DOI 10.54734/20722958_2024_3_195

Петрозаводский государственный университет
Россия, 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33
Селютина Любовь Федоровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и организация строительства»
E-mail: selutinalf@mail.ru
Бочарова Екатерина Сергеевна, магистрант
E-mail: katabocarova05623@gmail.com

Petrozavodsk State University
Russia, 185910, Petrozavodsk, 33, Lenin Avenue
Selutina Lyubov Feodorovna, Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Technologies and Construction Management»
E-mail: selutinalf@mail.ru
Bocharova Ekaterina Sergeevna, Master's student
E-mail: katabocarova05623@gmail.com

БРЕВЕНЧАТЫЙ ЖИЛОЙ ДОМ В ПЕТРОЗАВОДСКЕ – ОБЪЕКТ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Л.Ф. Селютина, Е.С. Бочарова

Представлены сведения об объекте культурного наследия регионального значения (дом одноэтажный, построен в 1910 г., стены бревенчатые с узловыми соединениями «в обло», крыша здания вальмовая; элементы стропильной системы выполнены из бревен и досок; соединения гвоздевые). Конструктивные решения, реализованные при строительстве дома, а также своевременный ремонт конструкций с выявленными дефектами обеспечили длительную эксплуатацию здания.

Ключевые слова: объект культурного наследия, стены бревенчатые, стропильная система, карниз, длительная эксплуатация

LOG RESIDENTIAL BUILDING IN PETROZAVODSK – AN OBJECT OF CULTURAL HERITAGE IN PETROZAVODSK: HISTORY AND METHODOLOGY OF THE STUDY

L.F. Selutina, E.S. Bocharova

Some information about the object of cultural heritage of regional significance is presented (the house is onestorey, built in 1910, log walls with modal connections in the «oblo»; the roof of the building is hip; the elements of the rafter system are made of logs and planks; nail connections). The constructive measures carried out during the construction of the house, timely repair of structures with identified defects ensured the long-term operation of building.

Keywords: an object of cultural heritage, log walls, rufter system, carnis, long-term operation

Введение

На территории Карелии находятся 4942 объекта культурного наследия, в том числе 1747 объектов федерального значения и 1193 – регионального значения [1].

Накопленные человечеством в течение тысячелетий культурные и духовные творения современный человек воспринимает как ценность, желая сохранить и передать эти творения будущим поколениям. Объекты, обладающие исторической и культурной ценностью, являются базисом современной культуры.

На Руси дерево было основным строительным материалом, разнообразно применяемым русским народом, что определило многообразие типологии построек. В результате развития многовековой традиции строительства из дерева было создано множество уникальных построек. Базисом для высокого уровня архитектурного мас-

терства стало жилище, которое следует воспринимать как неотъемлемую составляющую часть явления традиционного деревянного зодчества [2].

Основные тенденции и характерные черты формирования пространственной структуры деревянного жилья в городской и сельской местности, начиная от средних веков до 90-х годов двадцатого века, основные характеристики периодов развития отечественной практики создания деревянного жилища представлены в работе [2].

Однако, по мнению профессора В.П. Орфинского, до настоящего времени в исследованиях народного зодчества не решена проблема классификации жилых деревянных объектов на основе единых критериев [3].

Нами собраны и проанализированы сведения о деревянном здании, построенном в 1910 году в г.Петрозаводске Республики Карелия Российской Федерации. Исследование истории строительства здания, проведение обмеров выполнены с целью поиска совпадений геометрических размеров, конструктивных решений, сбора данных о параметрах конструкций жилых домов, построенных на различных территориях, определения возможностей замены существующих до реконструкции конструкций новыми элементами, приобретения навыков обследования деревянных конструкций с использованием современного оборудования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект культурного наследия «Дом Капусткиных» является памятником архитектуры регионального значения начала XX века. Учитывая задачи исследования здания, авторами был использован системный подход [4].

Строил дом Николай Гаврилович Капусткин. Семья переехала в дом в августе 1910 г. В настоящее время в доме живет правнучка Николая Гавриловича, Ирина Евгеньевна Александрова (в девичестве Капусткина), представитель 4-го поколения семьи Капусткиных.

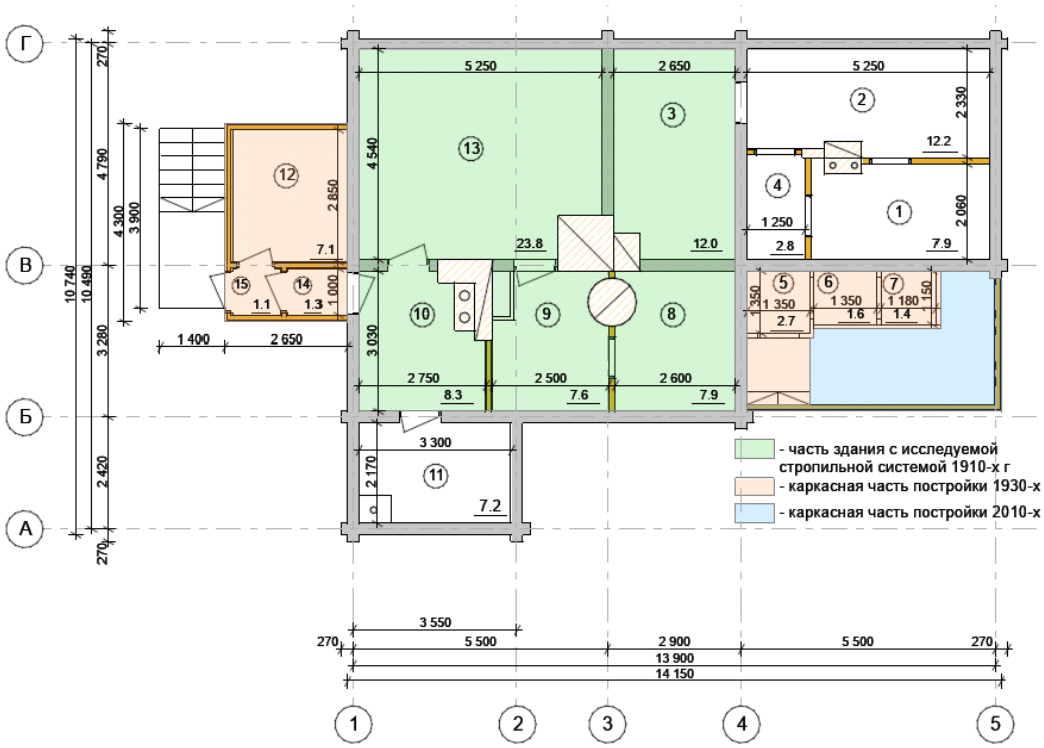
Дом деревянный одноэтажный, без подвала, поставлен на цоколь из блоков тесаного камня (рис. 1). Композиционно-пространственная структура состоит из основного квадратного в плане объема, покрытого высокой четырехскатной вальмовой крышей, и примыкающего к нему с запада (на продолжении главного фасада) прямоугольного объема под более низкой трехскатной крышей, с севера – небольшого сруба с односкатной кровлей.

Рис. 1. Южный фасад дома (май 2023 г.)

Каркасные обшивные тамбуры с открытыми крыльцами пристроены с северного и восточного фасадов.

Пристройки со стороны северного и восточного фасадов появились в середине XX века (изменена планировка здания). В 2010 г. выполнена замена досок карнизной части; новый кровельный материал – металлопласт – уложен на существующий рубероид в 2023 г.

План этажа дома показан на рис. 2.



Спецификация помещений		
№	Помещение	Площадь, м^2
1	Кухня	7,9
2	Жилая	12,2
3	Жилая	12,0
4	Коридор	2,8
5	Пристройка	2,7
6	Пристройка	1,6
7	Пристройка	1,4
8	Жилая	7,9
9	Жилая	7,6
10	Кухня	8,3
11	Туалет	7,2
12	Пристройка	7,1
13	Жилая	23,8
14	Пристройка	1,3
15	Пристройка	1,1

Рис. 2. План этажа дома

Состав и объем комплексных инженерно-технических исследований, необходимых для определения технического состояния здания, представлены в работах [5, 6]. Предложены этапы создания системы мониторинга в реальном масштабе времени с выбором методов неразрушающего контроля, необходимых приборов и инструментов. Проведение мониторинга средствами моделирования позволяет прогнозировать

поведение конструкций и здания в целом с учетом реализации восстановительных мероприятий [6].

Основные положения, регламентирующие состав и объем комплексных инженерно-технических изысканий, необходимых для определения технического состояния, реализации проектов ремонтно-реставрационных работ, консервации и приспособления для современного использования объектов культурного наследия, а также для получения достоверных данных о возникновении причин износа и разработки рекомендаций по их сохранению использованы в настоящих исследованиях.

Обследование здания выполняли в соответствии с требованиями СП 13-102-2003, п. 7.2. В 2023 г. выполнялся мониторинг состояния конструкций здания: в мае 2023 г. до замены кровельного материала, в июне – после завершения кровельных работ, в ноябре – перед понижением температуры наружного воздуха.

Авторами произведен внешний осмотр конструктивных элементов с выборочным фиксированием на цифровую камеру, что соответствует требованиям СП 13-102-2003 п. 7.2. Обследование включало в себя осмотр здания и отдельных конструкций с применением измерительных инструментов и приборов (бинокли, фотоаппараты, рулетки, штангенциркули, щупы).

Обмерные работы производились в соответствии с требованиями СП 13-102-2003 п.8.2.1. Целью обмерных работ являлось определение геометрических параметров строительных конструкций. Инструментальными измерениями уточнили пролеты конструкций, их расположение и шаг в плане, размеры поперечных сечений, высоту помещений, отметки характерных узлов, расстояния между узлами [7]. Обмеры геометрических параметров дома выполнялся с помощью измерительных инструментов: рулетки метрической TL5M ГОСТ 7502-98; дальномера DISTO classic/lite лазерного.

Также был отснят большой объем фотоматериала (фасады, стропильная система, узлы).

Габариты здания в плане 10,74 м (между осями «А-Г»), 14,15 м между осями «1-5», высота этажа составляет 2,8 м (см. рис. 2).

Стены рублены из круглого леса «в обло», не обшиты, декоративных элементов нет. Главный фасад на 6 окон ассиметрично разделен перерубами, крыша стропильная с покрытием по дороженному тесу. В июне 2023 г. выполнена укладка нового кровельного материала (металлопласт). Чердачное перекрытие деревянное.

По углам сруб связан специальными врубками – своеобразными бревенчатыми «замками». Специалисты утверждают, что типов и вариантов врубок в русском деревянном зодчестве насчитывалось несколько десятков. Наиболее часто применялись «в обло» и «в лапу».

«В обло» – наиболее простой и доступный способ, иногда также называемый «в чашу» (рис. 3). Он не требует трудоемких операций, так как нет потребности переворачивать венцы для вырубки полукруглого паза. Чаша обладает полукруглой формой без замков. В свою очередь, гладкая форма является основным недостатком, так как ветер легко проникает внутрь, в продольных пазах возможно скапливание влаги.

При рубке «в обло» (то есть округло) или «в простой угол» бревна соединялись таким образом, что их концы выступали наружу, за пределы сруба, образуя так называемый «остаток», потому этот прием именовался еще рубкой с остатком (см. рис. 3). Выступающие концы хорошо предохраняли углы избы от промерзания. Способ этот, один из самых древних, именовался также рубкой «в чашу», или «в чашку», поскольку для скрепления бревен в них выбирались специальные углубления «чашки». В старину чашки, как и продольные пазы в бревнах, вырубались в нижележащем бревне, – это так называемая «рубка в подкладку». Каждую чашку подгоняли точно по форме бревна, с которым она соприкасалась. Это было необходимо для обеспечения герметичности самых важных и наиболее уязвимых для воды и холода узлов сруба – его углов.

Физический осмотр здания включал поверхностную оценку макроструктуры древесины, состояния соединений элементов и имел важное значение при назначении программы дальнейших исследований [8].

По результатам обмеров получено, что стропила выполнены в полдерева сечением 120×220 мм, чердачные бревна имеют диаметр 250 мм, опорные бревна для стропил диаметром 200 мм. Обрешетка принята из доски 150×32 мм шагом 350 мм, сплошная обрешетка 150×25 мм. Затяжка – доска 175×25 мм. Шаг стропильных ног 1760 мм, 2080 мм.

На рис. 3–13 показаны детали стен и стропильной системы объекта культурного наследия – жилого дома в Петрозводске.

Рис. 3. Стена на северной стороне здания. Бревна диаметром 22–26 см

Рис. 4. Цоколь дома. Гранитные блоки и керамический кирпич

Продолжительность службы дома (более 100 лет) свидетельствует о том, что наряду с другими техническими решениями дома его фундамент и цоколь – технически грамотный пример конструктивного мероприятия, если понимать конструктивное мероприятие как создание такой конструкции, которая будет устойчива к конкретным для региона сезонным изменениям температурно-влажностных условий, нагрузок от снега, ветра и других разрушающих воздействий.

Рис. 5. Стена жилого дома. Северный фасад (фрагмент)

Рис. 6. Узел сопряжения наружных продольной и торцовой стен.
Справа на фото видна вальма. Более светлые доски в треугольной и трапециевидной частях крыши смонтированы в 2010 г. Наружные стены бревенчатые. Балки перекрытия: прямоугольного сечения (слева) и окантованная (справа) врублены в верхние бревна стен. Диагональная стропильная нога опирается на балку, окантованную на два канта и расположенную на верхних гранях продольной и поперечной балок чердачного перекрытия

Рис. 7. Узел опирания диагональной стропильной ноги на балку.
В мести опирания стропильной ноги прибита короткая доска

Рис. 8. Вид на вальму. Над затяжкой видны стропила крыши, соединенные в один узел.
Стропила расположены вдоль буквенных осей. Крепление стропил в коньке гвоздевое

Рис. 9. Деталь устройства карниза выпуском бревна за верхний венец стен по оси «Б» (ось показана на рис. 2). Стропильная нога опирается срезом на бревно. Бревно в месте опирания подтесано. Вдоль наружной стены расположены балки прямоугольного сечения

Рис. 10. Деталь выполнения карниза выпуском бревна за верхний венец. Стропильная нога прямоугольного сечения. Балка под стропильной ногой окантована на 2 канта. Справа более светлые доски прибиты после ремонта карнизной части крыши в 2010 г.

Рис. 11. Расположение балок (бревен) у трубы

Рис. 12. Узел опирания стропильной ноги на опорное бревно. Опорное бревно подтесано. На верхней грани стропильной ноги видно, что использована подкладка для создания нужно уровня опирания

Рис. 13. Вид на угол здания (оси). Крайняя балка прямоугольного сечения. Бревно для создания карниза диаметром 26 мм

Результаты

Выполнено обследование и мониторинг конструкций объекта культурного наследия регионального значения – одноэтажного бревенчатого дома, построенного в 1910 г. Описаны методы исследования конструкций и узлов. По углам дом связан специальными врубками «в обло». Представлена история здания и изменения, внесенные в последние годы. Стропильная система – вальмовая. Элементы стропильной системы выполнены из бревен и досок. Соединения элементов стропильной системы гвоздевые. Показано влияние своевременного устранения появившихся дефектов на долговечность здания.

Обсуждение

Композиционно-пространственная структура здания состоит из основного квадратного в плане объема, покрытого высокой четырехскатной вальмовой крышей и примыкающей к нему с запада (на продолжении главного фасада) прямоугольного объема под более низкой трехскатной крышей, с севера – небольшого сруба с односкатной кровлей. Тамбуры каркасной конструктивной системы появились в середине XX века. Стены бревенчатые, соединения в узлах «в обло». Крыша здания вальмовая. Элементы крыши выполнены из бревен и досок. Карнизный свес выполнен выпуском бревен за стены и составляет 100 см. Аналогичное решение карниза было отмечено в больнице постройки 1914 г. в Эссойле [9].

Дальнейшее развитие исследований объекта культурного наследия связано с применением технологий информационного моделирования. ТИМ обеспечивает удобную методологию для лучшего управления информацией, необходимой для решения проблемы сохранения исторических зданий.

Выполненное обследование показало, что технически грамотные конструктивные мероприятия на всех стадиях строительства, начиная с архитектурно-планировочных решений, а также своевременное и потому не требующее больших ресурсов восстановление деревянных конструкций жилого дома после небольших повреждений являются необходимыми условиями большого срока службы жилого дома (более 100 лет). Если эти условия не выполняются, то происходит прогрессирующее повреждение и разрушение строительных конструкций, что показано, например, в работе [10].

Заключение

Объект культурного наследия – жилой дом – построен в 1910 г. Н.Г. Капусткиным. Сейчас в нем живет четвертое поколение наследников Н.Г. Капусткина. Решения, реализованные строителем дома, на протяжении всех лет эксплуатации оказали положительное влияние на его долговечность. В течение срока эксплуатации дома в его конструкцию вносились изменения (пристройки, замена загнивших досок карнизной части, новый водоизоляционный слой крыши). Грамотные технологические решения, принятые при строительстве дома, постоянное проживание в нем людей и своевременные устранения появившихся дефектов определили долговечность здания.

Для дальнейших исследований здания планируется использование технологии информационного моделирования.

Список литературы

1. Статистические сведения по дислокации объектов культурного наследия Республики Карелия. – URL: https://monuments.karelia.ru/ob-ekty-kul-turnogo-nasledija/statisticheskie-svedenija-po-dislokacii-ob-ektov-kul-turnogo-nasledija-respubliki-karelija.

2. Дементьев, Д.А. Особенности развития жилого деревянного зодчества России: средние века – конец XX века / Д.А. Дементьев // Architecture and Modern Information Technologies. – 2021. – №1(54). – С. 43–61. – DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-43-6.1.

3. Орфинский, В.П. Типология Культового деревянного зодчества Русского Севера / В.П. Орфинский, И.Е. Гришина. – Петрозаводск, 2004. – 280 с.

4. Попов, А.О. Системный подход к анализу технического состояния объектов культурного наследия на примере корпуса «Орешек» Шлиссельбургской крепости / А.О. Попов, Л.Р. Маилян, Л.С. Сабитов, А.М. Данилов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №4. – С.199–205. – DOI: 10.5734/20722958_2023_4_199.

5. Akristiniy, V. Scientific aspects of the survey and evaluation of the technical state in implementation of preservation projects of cultural heritage objects / V. Akristiniy // MATEC Web of Conferences. – 2017. – 106. – 01033. – DOI: 10.1051/matecconf/201710601033.

6. Akristini,V. The monitoring of technical condition of cultural heritage objects. — DOI:10.1051/e3sconf/20199105020.

7. Norin, V. Measurements of building structures// E3S WEB of Conference 389,06008 (2023). –DOI:10.1051/e3sconf/202338906008.

8. Seliutina, L. Wooden roof structures of the Moberg house/ L. Seliutina, E. Ratkova, E. Okulova//E3S Web of Conferences 376, 03007 (2023). – DOI:10.1051/e3sconf/ 202337603007

9. Селютина, Л.Ф. Деревянные конструкции здания постройки 1914 года в поселке Эссойла / Л.Ф. Селютина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №1. – С.119–125.

10. Корнеев, А.А. Анализ состояния и возможностей сохранения объекта культурного наследия в Повенце./ А.А. Корнеев, Е.И. Ратькова, Л.Ф. Селютина// Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №1. – С.186–195. – DOI: 10.54734/ 20722958_2023_1_186.

References

1. Statistisal information on the location of the location of cultural heritage site of the Republic of Karelia – URL: https://monuments.karelia.ru/ob-ekty-kul-turnogo-nasledija/statisticheskie-svedenija-po-dislokacii-ob-ektov-kul-turnogo-nasledija-respubliki-karelija.

2. Dementev, D. The Some Features of Russian Residential Wooden Architecture Development: from Middle Ages to the End of the 20th Century / D. Dementev // Architecture and Modern Information Technologies. – 2021. – No. 1(54). – P. 43–61. – DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-43-61.

3. Orfinsky, V.P. Tipology of the cult wooden architecture of the Russian North/ V.P. Orfinsky. I.E. Grishina. – Petrozavodsk, 2004. – 280 p.

4. System approach to analyzing technical condition of cultural heritage objects on the example of « ORESHEK» Building of the SHLISSENBURG fortess // Regional architecture and engineering. – 2023. – №4(57). – P.199–205. – DOI: 10.5734/20722958_2023_4_199.

5. Akristiniy, V. Scientific aspects of the survey and evaluation of the technical state in implementation of preservation projects of cultural heritage objects / V. Akristiniy // MATEC Web of Conferences. – 2017. – 106. – 01033. – DOI: 10.1051/matecconf/201710601033.

6. Akristini,V. The monitoring of technical condition of cultural heritage objects. — DOI:10.1051/e3sconf/20199105020.

7. Norin, V. Measurements of building structures// E3S WEB of Conference 389,06008 (2023). –DOI:10.1051/e3sconf/202338906008.

8. Seliutina, L. Wooden roof structures of the Moberg house/ L. Seliutina, E. Ratkova, E. Okulova//E3S Web of Conferences 376, 03007 (2023). – DOI:10.1051/e3sconf/ 202337603007

9. Selutina, L.F. Wooden structures of the building built in 1914 in the village of Essoila / L.F. Selutina // Regional architecture and engineering. – 2020. – №1. – P.119–125.

10. Korneev, A.A. Analysis of the state and possibilities of preservation a cultural heritage site in Povenets// A.A. Korneev, E.I. Ratkova, L.F. Selutina// Regional architecture and engineering.– 2023. – №1. – P.186 – 195. – DOI: 10.54734/20722958_2023_1_186.

УДК 725.4 DOI 10.54734/20722958_2024_3_207

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
Россия, Донецкая Народная Республика, 286123, г.о. Макеевский, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2
Лобов Игорь Михайлович, кандидат архитектуры, доцент
E-mail: i.m.lobov@donnasa.ru
Ступина Ангелина Эдуардовна, асистент
E-mail: a.e.stupina@donnasa.ru
Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)
Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6
Гарькин Игорь Николаевич, кандидат технических наук, кандидат исторических наук, зав. кафедрой «Зашита в чрезвычайных ситуациях»
E-mail:igor_garkin@mail.ru
НОА «Ростехэкспертиза»
105318, г. Москва, ул. Ибрагимова, д.15
Ахтямова Лейсан Шамилевна, инженер
E-mail: leisan21@gmail.com

Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture
Russia, Donetsk People's Republic, 286123, city district. Makeevsky, Makeevka, 2, Derzhavina St.
Lobov Igor Mikhailovich, Candidate of Architecture, Associate Professor
E-mail email: i.m.lobov@donnasa.ru
Stupina Angelina Eduardovna, Candidate of Architecture, Associate Professor
E-mail: a.e.stupina@donnasa.ru
Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (first Cossack University)
Russia, Penza, 6, Volodarskogo St.
Garkin Igor Nikolaevich, Candidate of Sciences, Candidate of Historical Sciences, Head of the Department «Protection in Emergency Situations»
E-mail: igor_garkin@mail.ru
NOA «Rostechexpertiza
105318, Moscow, st. Ibragimova, 15
Akhtyamova Leisan Shamilevna, Engineer
E-mail: leisan21@gmail.com

АРХИТЕКТУРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ НЕДЕЙСТВУЮЩИХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ (НА ПРИМЕРЕ ДОНБАССА)

И.М. Лобов, А.Э. Ступина, И.Н. Гарькин, Л.Ш. Ахтямова

Отмечено, что современные условия развития рыночной экономики создали неконкурентоспособность целого ряда производств, что привело к закрытию промышленных предприятий, при этом для строительства новых рентабельных производств нет свободных территорий. Указаны наиболее перспективные способы архитектурно-градостроительного освоения территорий. Даны научно-практические рекомендации по архитектурному формированию строительных производственных комплексов на базе недействующих угольных шахт.

Ключевые слова: строительный производственный комплекс, архитектурное формирование, реновация, методы, угольные шахты

ARCHITECTURAL FORMATION OF CONSTRUCTION PRODUCTION COMPLEXES BASED ON NON-OPERATING COAL MINES (BASED ON THE EXAMPLE OF DONBASS)

I.M. Lobov, A.E. Stupina, I.N. Garkin, L.Sh. Akhtyamova

Modern conditions for the development of a market economy have created the uncompetitiveness of a number of industries, which has led to the closure of industrial enterprises, but of the some time there is a shortage of free territories for the construction of new profitable industries. The most promising method of architectural and urban development of territories has been identified. The

author have proposed scientific and practical recommendations for the architectural formation of construction production complexes based on inactive coal mines.

Keywords: architectural formation, construction industrial complex, renovation

В реалиях XXI века развитие рыночной экономики привело к закрытию промышленных предприятий с деградацией их территорий. Их основная масса относится к угледобывающей отрасли, которая является основной на Донбассе (закрытые предприятия находятся непосредственно рядом с городской застройкой и вносят дисгармонию в композиционно-планировочную структуру городов). На территории Донецкой Народной Республики отмечается потребность в комплексном освоении территорий, зданий и сооружений недействующих угольных шахт; одним из наиболее перспективных способов архитектурно-градостроительного освоения этих территорий является реновация (по причине отсутствия свободных территорий для нового строительства [1]). В соответствии со стратегией пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года предполагается повышение конкурентоспособности экономик субъектов Российской Федерации путем обеспечения условий для развития производства товаров и услуг в отраслях перспективных экономических специализаций субъектов Российской Федерации [2].

Для проведения реновации рассматриваются территории и инфраструктура угольных шахт, которые закрываются, ликвидируются или консервируются, а также гидрозащитные шахты в пригодном для реконструкции состоянии с износом менее 60 %. Предпочтение отдается угольным предприятиям, расположенным в промышленных группах или промышленных узлах, вдали от жилой территории города и соответствующим критериям безопасного размещения строительных производственных комплексов. Учитываются: особенности процесса закрытия, возможность ликвидации или консервации нерентабельных угольных шахт, а также проектирования объектов в соответствии с действующим законодательством. Исходные данные для проектирования включают техническое задание на проектирование строительных производственных комплексов, выданное заказчиком, и правила безопасности на угольных шахтах. Проект закрытия угольного предприятия должен иметь положительное заключение государственной санитарно-эпидемиологической экспертизы. При разработке проектного предложения выбираются подходящие недействующие угольные шахты в радиусе 5–10 км для объединения угольных предприятий в единый комплекс (территории одной шахты недостаточно для формирования строительных производственных комплексов) [3].

Архитектура промышленного района существенно воздействует на восприятие окружающего природного и урбанизированного пространства; в значительной степени определяет облик города, формируя его индустриальный силуэт. Архитектурно-пространственная среда промышленного района находится в постоянном развитии, которое в современных условиях идет все более быстрыми темпами. Этот процесс приводит к состоянию незавершенности архитектурной композиции сложившегося промышленного района, формированию разноплановой материальной среды, насыщенной старыми и новыми промышленными зданиями, инженерными сооружениями и техническими устройствами. Все объекты образуют большую пространственную структуру, определяющую архитектурный облик района. Развитие промышленного района приводит к некоторой хаотичности его застройки и требует корректировки при реконструкции. Реновация архитектурно-пространственной организации промышленного района зависит от его размеров и размещения в планировочной структуре города, значимости отрасли производства и ее мощности, численности работающих на предприятиях, эстетического состояния и культурной ценности застройки. При выборе приемов реконструкции следует ориентироваться и на восприятие архитектурной композиции главных пешеходных подходов, прилегающей жилой застройки и транзитного транспортного движения [4].

Нами рассмотрены три типа недействующих угольных шахт, несущих в себе определенные функции. В шахте первого типа предусматривается основное произ-

водство по переработке строительного мусора и возможной переработке ПЭТ-бутылок. Здесь особенностью объекта является следующее:

– территория проектируемого мусороперерабатывающего завода делится на производственную и вспомогательную (хозяйственную) зоны;

– производственная зона включает технологические участки;

– вспомогательная зона (хозяйственная) предназначается для размещения дополнительных складов и объектов [5].

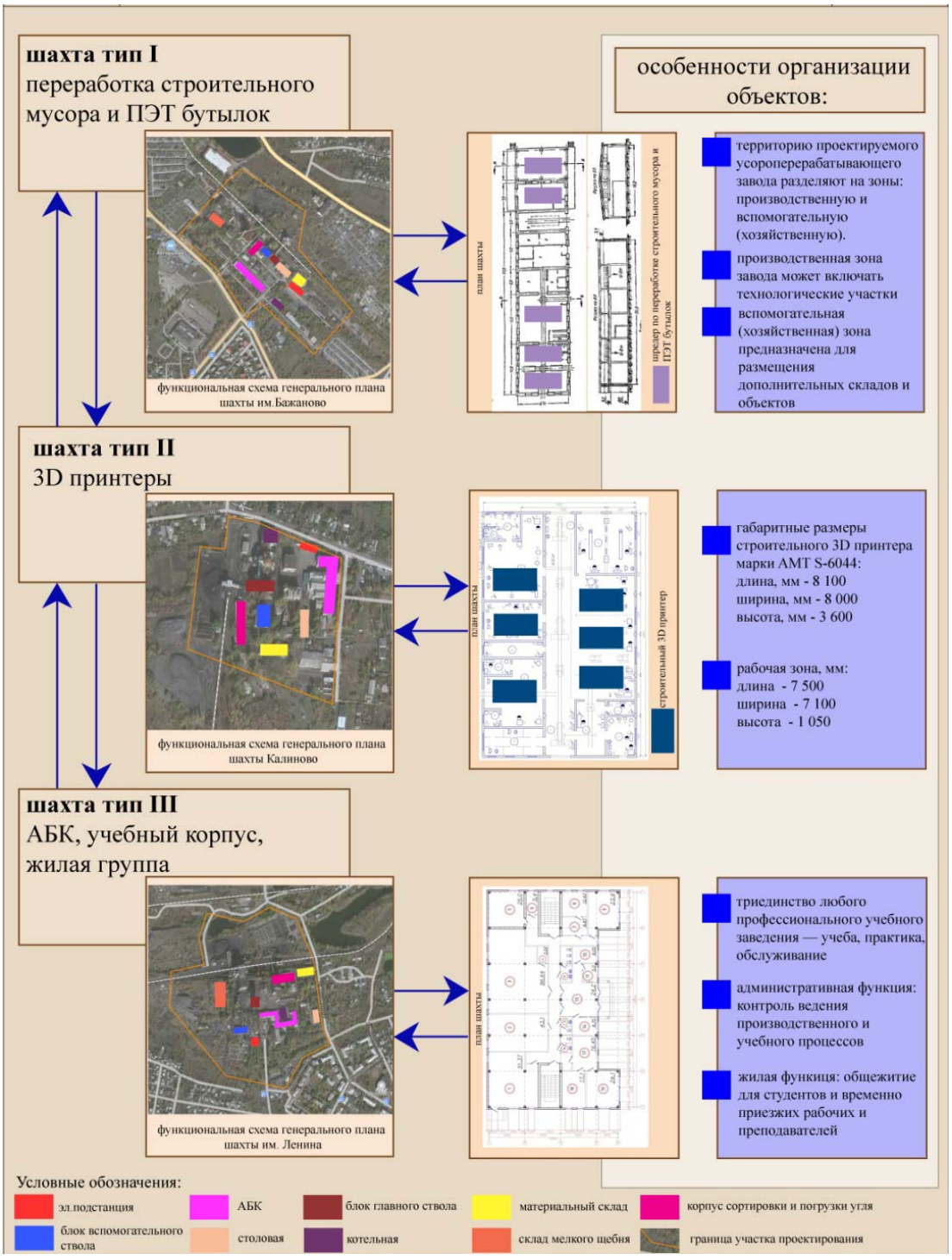


Рис. 1. Особенности функциональной и объемно-пространственной организации объектов строительной индустрии на базе недействующих угольных шахт

Рис. 2. Схема существующего зонирования с фотофиксацией

Рис. 3. Опорный план существующей застройки

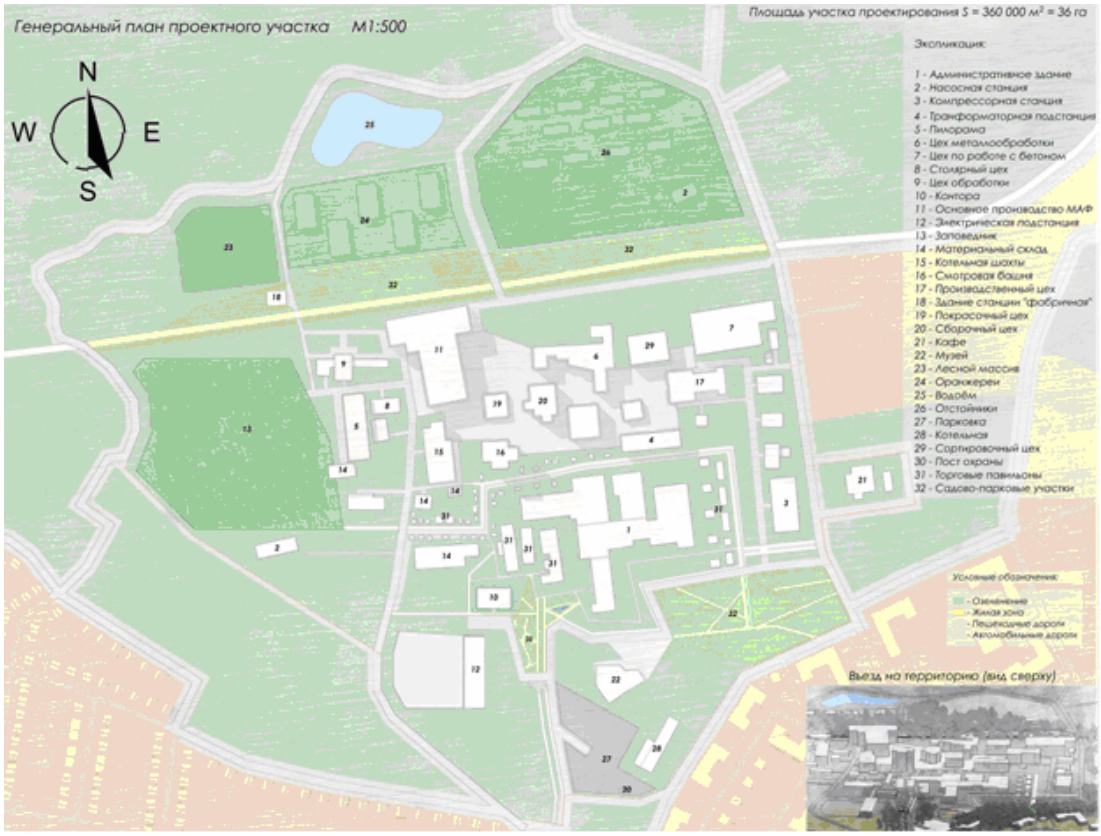


Рис. 4. Генеральный план проектируемого участка

Рис. 5. Схема функционального зонирования

Рис. 6. Вид застройки

В шахте второго типа предусматривается основное производство с применением строительного 3D-принтера (габаритные размеры марки AMT S-6044: длина – 8,1 метра, ширина – 8,4 метра, высота – 3,6 метра; рабочая зона: длина – 7,5 метра, ширина – 7,1 метра, высота – 1,5 метра). Они могут печатать объекты с размерами от десятков сантиметров до нескольких метров; могут быть стационарными или мобильными, что позволяет им работать на строительных площадках или в полевых условиях [6, 7].

Шахта третьего типа предусматривает создание административно-бытового комбината и учебного корпуса, также на территории может быть предусмотрена жилая группа для студентов и рабочих данного строительного комплекса. Как и любое профессиональное учебное заведение, включает в себя триединство – обучение, практику и обслуживание [8]. Административная функция (административно-бытовой комбинат) – контроль ведения производственного и учебного процесса; жилая функция – общежитие для студентов и временно приезжих рабочих и преподавателей.

На рис. 1–6 на основе проведенных нами исследований предложены функционально-планировочные схемы взаимосвязей помещений реновации шахт под строительную функцию: 3 выбранные недействующие угольные шахты между собой закольцованы железной дорогой (упрощает логистику при перевозке материалов для изготовления или готовой продукции). Шахта первого типа подразумевает под собой взаимосвязи помещений основного производства, на которое привозится строительный мусор для дальнейшей переработки. Главный вход может служить элементом архитектурного оформления здания и выполнять декоративные функции. Вестибюль на входе в здание служит для разделения различных зон здания и обеспечения комфорта для работников; может быть использован для ожидания, отдыха, хранения вещей, а также как место для встреч и общения. В административно-бытовом комбинате предусматривается пункт охраны, гардероб, раздевалки, санузлы, душевые, медицинский пункт, кабинет директора, бухгалтерия, администрация, лаборатория и столовая. С административно-бытовым комбинатом и основным производством связаны: котельная, электроподстанция, резервуары для воды, гараж строительной техники, склад сырья, склад готовой продукции и строительный полигон. Из вестибюля можно попасть в основное производство (завод по переработке строительного мусора).

В проектном предложении для шахты второго типа предусмотрены главный вход и вестибюль. Из вестибюля можно попасть в основное производство (цеха, в которых установлены 3D-принтеры). По проектному предложению строительный 3D-принтер можно установить в цехах угольных шахт. Цеха угольных шахт имеют стандартную сетку колонн 6м на 6м или 9 м на 9 м, а размеры выбранного подходящего принтера фирмы AMT S-6044 LONG составляют 8,1 м на 8 м, что позволяет поместить данный принтер в цех [9]. Основное производство взаимосвязано с дополнительными помещениями (котельная, электроподстанция, резервуары для воды и гараж для строительной техники). Для полноценного процесса работы основного производства предусмотрен научно-исследовательский центр (лаборатория качества, препараторская, кабинет научных сотрудников, с/у для персонала, мастерские и проектный отдел); научно-исследовательский центр имеет служебный вход. Вспомогательное производство, строительный полигон с резервом расширения производства, склад готовой продукции и склад сырья также имеют взаимосвязь с основным производством.

В проектном предложении для шахты третьего типа имеется главный вход и вестибюль. Основное производство – учебный центр (предназначен для обучения и повышения квалификации сотрудников предприятия). В самом учебном центре предусмотрены аудитории, лекционные залы, библиотека, конференц-залы, офисы, актовый зал, компьютерный класс, архив и с/у. Основное производство учебного центра – это помещение с установленным 3D-принтером, на котором сотрудники и люди, которые пришли на обучение для дальнейшей работы на этом предприятии, могли бы обучиться работе на оборудовании, проходили бы производственную практику. Основное производство взаимосвязано с котельной, электроподстанцией, резервуарами для воды, гаражом для строительной техники, помещениями для экспозиции товаров и центра интеллектуальной собственности (ЦИС – структурное

подразделение промышленного предприятия, занимающееся вопросами охраны и защиты прав на результаты интеллектуальной деятельности) [10].

Для оздоровления сотрудников строительного производственного комплекса предусмотрен профилакторий, в котором организованы: зал диетического питания и диетическое отделение при столовой, группа помещений социокультурной подготовки, группа помещений психопрофилактической подготовки, группа функциональной экспресс-диагностики, группа физиотерапии, отделение водолечения, бассейн оздоровительного плавания с теплой водой и системой подводного массажа, зал лечебно-профилактической физкультуры, станция по обеспечению работников специальными профилактическими напитками, кабинет мануальной терапии и массажа и другие помещения.

Выводы

1. Предложены научно-практические рекомендации архитектурного формирования строительных производственных комплексов на базе недействующих угольных шахт.

2. Показано, что создание строительного производственного комплекса путем реновации недействующих угольных шахт позволяет существенно снизить издержки на их ликвидацию и на создание на их базе актуального, рентабельного, высокотехнологичного предприятия, не загрязняющего окружающую среду.

3. Реновация эффективно реализует потенциал исчерпавшей ресурс угольной шахты и способствует решению социально-экономических задач, связанных с ее закрытием. Архитектурное формирование строительных производственных комплексов на базе недействующих угольных шахт позволит обеспечить экономическое и социальное развитие территории Донецкой Народной Республики.

Список литературы

1. Шеина, С.Г. Пример применения BIM технологий при обследовании зданий и сооружений / С.Г. Шеина, Е.В. Виноградова, Ю.С. Денисенко // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 6. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037

2. Мирхасанов, Р.Ф. Композиционная форма в архитектуре конца XIX века: эволюция инженерной мысли / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2(55). – С. 157–161.

3. Есаулов, Г.В. Устойчивая архитектура – от принципов к стратегии развития / Г.В. Есаулов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №. 6. – С. 9−25.

4. Мирхасанов, Р.Ф. Инженерно-строительная эстетика в постройках Пэна С.С. / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 3 (56). – С. 211–216.

5. Соловьев, Д.Б. Сравнение эффективности использования технологий bim и cad с помощью математической модели / Д.Б. Соловьев, В.Г. Копотилова, Д.П. Катюк, А.В. Пирус, В.А. Григорюк, А.И. Крылова // Строительные материалы и изделия. – 2021. – Т. 4, № 1. – С. 18–26.

6. Лапшина, Е.Г. Динамическая архитектура в пространстве современного города / Е.Г. Лапшина, Я.И. Сухов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2(43). – С. 171–177.

7. Лапшина, Е.Г. Концепция архитектурного пространства городов: динамическая составляющая / Е.Г. Лапшина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 170–176.

8. Скачков, Ю.П. Модификация метода ПАТТЕРН к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 1. – С. 4–9.

9. Гойкалов, А.Н. Разработка метода оценки качества архитектурно-исторической среды / А.Н. Гойкалов, Т.В. Макарова, А.Ю. Семенихина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 1(39). – С. 73–79.

10. Попов, А.О. Использование технологий информационного моделирования при обследовании объектов культурного наследия / А.О. Попов, И.Н. Гарькин, Л.С. Сабитов, Э.Ю. Абдуллазянов // Инженерные исследования. – 2024. – № 1 (16). – С. 23–29.

References

1. Sheina, S.G. An example of the use of BIM technologies in the inspection of buildings and structures / S.G. Sheina, E.V. Vinogradova, Yu.S. Denisenko // Engineering Bulletin of the Don. – 2021. – No. 6. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037

2. Mirkhasanov, R.F. Compositional form in the architecture of the late 19th century: the evolution of engineering thought / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 2(55). – P. 157–161.

3. Esaulov, G.V. Sustainable architecture – from principles to development strategy / G.V. Esaulov // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2014. – No. 6. – P. 9−25.

4. Mirkhasanov, R.F. Engineering and construction aesthetics in the buildings of Pen S.S. / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 3 (56). – P. 211–216.

5. Solovyov, D.B. Comparison of the effectiveness of using bim and cad technologies using a mathematical model / D.B. Solovyov, V.G. Kopotilova, D.P. Katyuk, A.V. Pirus, V.A. Grigoryuk, A.I. Krylova // Construction materials and products. – 2021. – Vol. 4, No. 1. – P. 18–26.

6. Lapshina, E.G. Dynamic architecture in the space of a modern city / E.G. Lapshina, Ya.I. Sukhov // Regional architecture and construction. – 2020. – No. 2(43). – P. 171–177.

7. Lapshina, E.G. The concept of urban architectural space: dynamic component / E.G. Lapshina // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 4 (53). – P. 170–176.

8. Skachkov, Yu.P. Modification of the PATTERN method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2011. – No. 1. – P. 4–9.

9. Goikalov, A.N. Development of a method for assessing the quality of the architectural and historical environment / A.N. Goikalov, T.V. Makarova, A.Yu. Semenikhina // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. – 2022. – No. 1(39). – P. 73–79.

10. Popov, A.O. The use of information modeling technologies in the examination of cultural heritage sites / A.O. Popov, I.N. Garkin, L.S. Sabitov, E.Yu. Abdullazyanov // Engineering Research. – 2024. – N. 1 (16). – P. 23–29.

УДК 534.2 DOI 10.54734/20722958_2024_3_214

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

Антонов Александр Иванович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Архитектура и градостроительство»
E-mail: aiant58@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 Alexander 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;

Antonov Alexander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the Department «Architecture and Urban Planning»
E-mail: aiant58@yandex.ru

Ledenev Vladimir Ivanovich,
Doctor of Technical 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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОГО ШУМА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В ПОМЕЩЕНИИ

А.В. Гречишкин, А.И. Антонов, В.И. Леденев, И.В. Матвеева

Импульсный шум по характеру излучения и последующему воздействию на человека относится к наиболее неблагоприятным шумам. Для оценки воздействия этого вида шума нами предложен метод расчета его энергетических параметров, учитывающий зеркально-диффузный характер отражения звука от ограждений помещения. Приведены результаты экспериментальной оценки метода, выполненные в соразмерном и длинном помещениях. Установлено, что предложенный комбинированный метод расчета шума обладает достаточной точностью и может использоваться при проектировании защиты от импульсного шума.

Ключевые слова: импульсный шум, расчеты шума, промышленные и гражданские здания, меры шумозащиты, экспериментальные исследования шума

EXPERIMENTAL EVALUATION OF A COMBINED METHOD FOR CALCULATING PULSE NOISE PROPAGATING IN A ROOM

A.V. Grechishkin, A.I. Antonov, V.I. Ledenev, I.V. Matveeva

Pulse noise, by the nature of radiation and subsequent effects on humans, is one of the most unfavorable noises. To assess the impact of this type of noise, the authors have proposed a method for calculating its energy parameters, taking into account the mirror-diffuse nature of sound reflection from the room fences. The article presents the results of an experimental evaluation of the method

performed in proportionate and long rooms. It is established that the proposed combined noise calculation method has sufficient accuracy and can be used in the design of protection against pulse noise.

Keywords: pulse noise, noise calculations, industrial and civil buildings, noise protection measures, experimental noise studies

Введение. В настоящее время на промышленных предприятиях широко используется оборудование, излучающее при работе импульсный шум. Известно, что импульсный шум оказывает по сравнению с постоянным шумом более неблагоприятное воздействие на организм человека [1–3]. Необходима разработка мероприятий по его ограничению [1, 4]. Для оценки такого воздействия и выбора мер по снижению импульсного шума в настоящее время разработаны методы его расчета. Наиболее универсальными из них являются комбинированные методы, реализующие зеркально-диффузную модель отражения звука от ограждающих конструкций помещений [5, 6]. Методы позволяют оценивать пространственно-временные изменения импульсной звуковой энергии в помещениях.

В работе [6] представлены результаты анализа комбинированных методов расчета. Установлено, что для помещений правильной геометрической формы наиболее приемлемой является расчетная модель, включающая в себя два метода расчета отраженной звуковой энергии, а именно метод мнимых источников для определения зеркальной составляющей отраженного шума и метод, основанный на решении уравнения Куттруфа, для определения диффузной составляющей шума. Ниже приведены результаты экспериментальной оценки комбинированного метода расчета, реализующего данную расчетную модель. Целью сравнения экспериментальных и расчетных данных является установление соответствия метода расчета акустическим процессам, протекающим в помещениях при действии импульсных источников звука, и определение его точности при различных характеристиках помещений и акустических параметрах источника.

Методика расчета импульсного шума комбинированным методом. При зеркально-диффузном отражении звука от ограждений в помещении образуется сложное звуковое поле, включающее в себя энергию прямого звука, зеркальную и диффузную составляющие отраженной энергии. Уровни изменяющегося во времени звукового давления в этом случае определяются по выражению

$$L_{\tau i} = 10 \lg \frac{\left[(\varepsilon_{\tau i}^{\text{пр}} + \varepsilon_{\tau i}^{\text{з}} + \varepsilon_{\tau i}^{\text{д}}) c \right]}{I_0}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon_{\tau i}^{\text{пр}}, \varepsilon_{\tau i}^{\text{з}}, \varepsilon_{\tau i}^{\text{д}}$ – плотности прямого звука, зеркальной и диффузной составляющих отражённого звука в i-й расчётной точке помещения в момент времени τ соответственно; I_0 – пороговое значение интенсивности звука; c – скорость звука в воздухе.

Методика расчета энергетических параметров звукового поля заключается в следующем. Методом мнимых источников производится расчет плотности энергии прямого звука и зеркальной составляющей отражённого звука. В случае точечного источника звука расчетное выражение имеет вид

$$\varepsilon_{\tau i}^{\text{пр}} + \varepsilon_{\tau i}^{\text{з}} = \frac{1}{4\pi c} \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \sum_{q=-\infty}^{q=\infty} \frac{W_t \cdot \Pi_{j=1}^{6} (1 - \alpha_{ycj})^{k_j} \cdot \exp(-m_{\text{в}} r_{mnq})}{r_{mnq}^2}, \qquad (2)$$

где r_{mnq} – расстояние от действительного и мнимых источников $|m| + |n| + |q|$ порядков до расчетной точки; k_j – количество встреч луча от мнимого источника с j-й поверхностью помещения (для прямого звука k_j=0; W_t – звуковая мощность импульсного источника; $m_{\text{в}}$ – коэффициент затухания звука в воздухе; α_{ycj} – «условный» коэффициент поверхности с учетом частичного рассеивания звука при его зеркально-диффузном отражении [4].

Коэффициент α_{ycj} определяется по формуле

$$\alpha_{ycj} = \alpha_j + \beta_j - \alpha_j\beta_j, \tag{3}$$

где α_j, β_j – коэффициенты звукопоглощения и рассеяния на *j*-й поверхности ограждения соответственно.

В результате частичного рассеивания прямого и зеркально отраженного звука на каждом элементе ограждения происходит формирование интенсивности диффузно рассеянной энергии:

$$I^0_{ds',\tau} = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty}\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}\sum_{q=-\infty}^{q=\infty} \frac{W_t \Pi_{j=1}^{6}(1-\alpha_{ycj})^{k_j} \cdot \exp(-m_в r_{mnq})\cos\theta_{mnq}}{4\pi r_{mnq}^2}, \tag{4}$$

где θ_{mnq} – угол падения звуковых лучей от прямого и мнимых источников на элемент ограждения ds' (рис. 1).

Расчет диффузной составляющей отраженной энергии выполняется путем численного решения интегрального уравнения Куттруфа. Величина интенсивности диффузной энергии на поверхности ds' в момент времени τ определяется как

$$I_{ds',\tau} = \int_s \frac{I_{(ds,t)}(1-\alpha_s)\cos\theta_1\cos\theta_2}{\pi r^2} ds + I^0_{ds',t}(1-\alpha'_s)\beta, \tag{5}$$

где $I_{(ds,t)}(1-\alpha_s)$ – интенсивность падающей на элемент ds' диффузно отраженной звуковой энергии, приходящей от других элементов *dS*. Остальные обозначения даны на рис. 1.

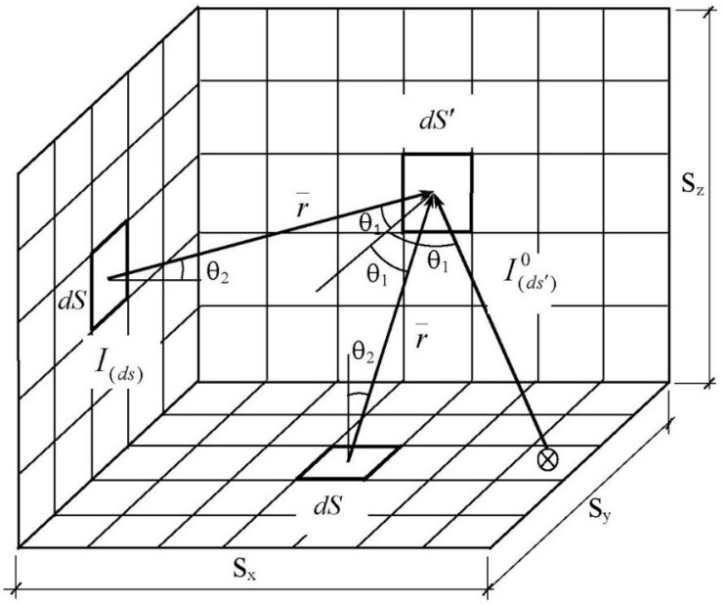


Рис. 1. Расчетная схема к численному решению уравнения Куттруфа

Величина плотности диффузной составляющей отраженной энергии в *i*-й расчетной точке в момент времени τ определяется на основе рассчитанных по уравнению (5) значений интенсивности звука по формуле

$$\varepsilon^{д}_{\tau i} = \int_s \frac{I_{ds',t}(1-\alpha_{s'})\cos\theta_2 \cdot ds'}{\pi r_{s'}^2 c} \exp(-m_в r_{s'}). \tag{6}$$

Окончательно уровни звуковой энергии рассчитываются по выражению (1).

Более подробно методика расчета рассмотрена в [6]. Для реализации метода разработана компьютерная программа, позволяющая производить вычисления при различных значениях β от β=0 до β=1.

Экспериментальные исследования. При экспериментальных исследованиях использовано два блока приборов, необходимых для генерации и регистрации импульсного шума. Блок генерации состоит из источника импульсного шума, усилителя звука и излучателя шума. В качестве источника импульсных шумов использовался смартфон (компьютер), от которого сигнал через кабель подавался на усилитель (OED-PA360). Излучение шума производилось всенаправленным источником звука (додекаэдром) ОЕД SP-012-600. Акустическая мощность источника шума – 90 дБ и выше. Измерения выполнялись шумомером ЭКОФИЗИКА-110А. Измеренные значения шумов с различными частотными и временными коррекциями сохранялись в памяти шумомера. С помощью программного обеспечения приборов Октава «110UTIL» осуществлялась их запись в файл для последующего использования. Для оценки точности расчетного метода выполнены исследования измеренных импульсных уровней звукового давления в соразмерном помещении и в помещении коридорного типа сложной формы. Источник шума излучал прямоугольные импульсы различной длительности Δt и периодичности T.

Так как в промежутке между излучаемыми импульсами звука происходит затухание звуковой энергии, необходимо оценивать происходящие процессы реверберации. Их важной характеристикой является степень отклонения формы графиков от линейной функции как один из показателей диффузной модели отражения звука от ограждений. Согласно рекомендациям ГОСТ Р ИСО 3382-2-2013 установлены показатели нелинейности графиков реверберации.

Для этого выполняется **линейная аппроксимация графика** реверберации, например методом наименьших квадратов. В общем виде функция аппроксимации может быть записана в виде уравнения

$$L = at + b, \tag{7}$$

где L – значение уровня звука в момент времени t; a, b – коэффициенты аппроксимации. Анализ показывает, что коэффициенты a и b уравнения определяют время реверберации и максимальный уровень в начале процесса реверберации.

Степень отклонения графиков от линейной функции оценивается следующими показателями:

– квадрат коэффициента корреляции

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{L}_i - \bar{L})^2}{\sum_{i=1}^{n}(L_i - \bar{L})^2}, \quad \bar{L} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} L_i, \tag{8}$$

где $\hat{L}_2 = at_i + b$ – значение аппроксимации уровня по выражению (6) для времени t_i. В случае линейной формы графика затухания уровней звука r^2=1. Чем меньше квадрат коэффициента корреляции, тем значительнее кривая спада уровней при реверберации отличается от прямой линии;

– параметр нелинейности графика

$$\xi = 1000(1 - r^2). \tag{9}$$

В случае, если ξ>10 ‰, график существенно отклоняется от прямой линии, и полученные результаты обработки графика будут недостоверными;

– степень кривизны начального участка графика затухания звуковой энергии

$$C = 100\left(\frac{T_{30}}{T_{20}} - 1\right). \tag{10}$$

Определяется по различиям в значениях времени реверберации по участкам затухания энергии на 20 и 30 дБ. Значение C > 10% указывает на значительное отклонение формы графика от прямой линии.

Результаты экспериментальных исследований в соразмерном помещении. Исследования изменений во времени уровней звукового давления при действии импульсного источника шума выполнены в помещении учебной аудитории с размерами

11,6×5,7×3,24 м. Измерения выполнены в пустом помещении и в помещении с мебелью. В аудитории установлено 20 деревянных столов и 40 полумягких стульев с набивкой толщиной 30-40 мм (рис. 2). Специальная звукопоглощающая облицовка ограждений отсутствует. Пол с линолеумным покрытием, стены кирпичные оштукатуренные, перекрытие из железобетонных плит, отделка – водоэмульсионная окраска, окна – с металлопластиковыми переплетами.

Геометрические и акустические параметры помещения приведены в табл. 1. Исследования параметров звуковых полей импульсного источника шума выполнены в октавной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц, на которой источник импульсного шума обеспечивал наибольшую мощность 108 дБ, а измеренные значения шума значительно превышали фоновый шум, равный $L_ф$=25–35 дБ.

а б

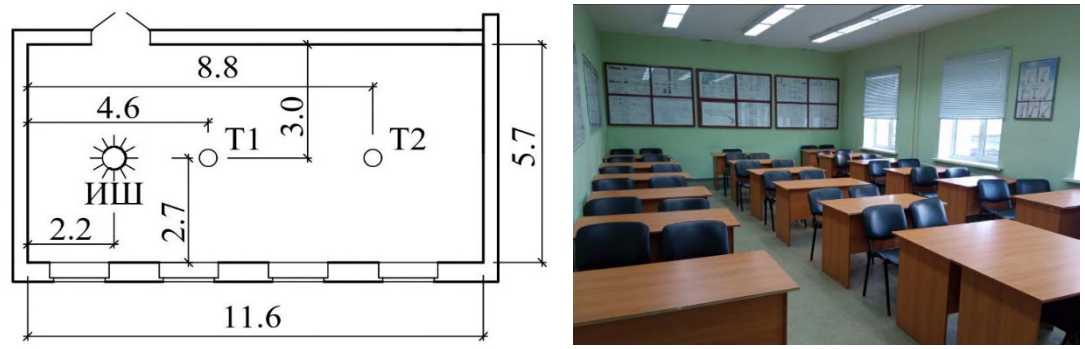


Рис. 2. Помещение для проведения исследования:
а – схема помещения с указанием положения расчётных точек и положения источника шума;
б – фото учебной аудитории с мебелью

Таблица 1

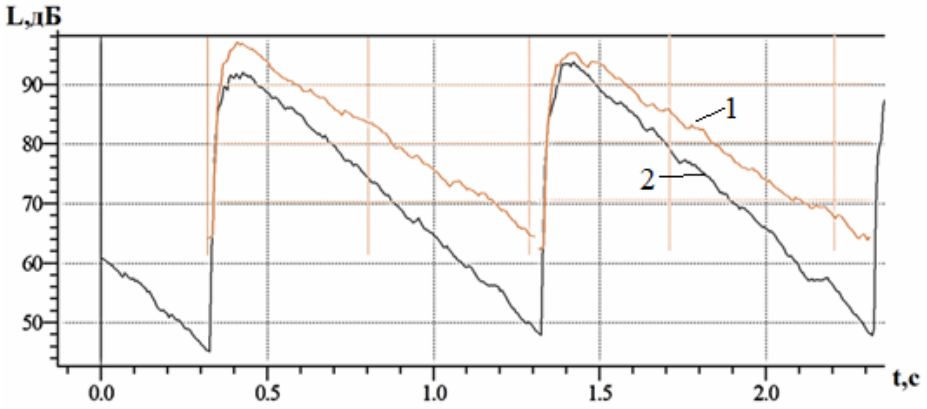
Геометрические и акустические параметры помещения

Характеристика	Значение характеристики	
Размеры помещения, м: длина ширина высота	11,6 5,7 3,2	
Средняя длина свободного пробега лучей, м	3,5	
Координаты источника шума, м (*x;y;z*)	2.2, 2.7, 1	
Координаты расчетной точки, м (*x;y;z*) T1 T2	4.6, 2.7, 1.5 8.8, 2.7, 1.5	
Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц	1000	
Уровень акустической мощности источника шума, дБ	108	
Пространственный коэффициент поглощения звука в воздухе, $м^{-1}$	0.0012	
Наличие мебели	нет	да
Время реверберации, с	1.68	1.15
Средний коэффициент звукопоглощения ограждений	0.08	0.11

Как видно из табл. 1, мебель оказывает существенное влияние на процессы формирования звукового поля. Время реверберации при наличии мебели снижается почти в полтора раза – с 1,68 с до 1,15 с. В такой же пропорции увеличивается коэффициент звукопоглощения. На рис. 3 приведены измеренные и рассчитанные графики изменения импульсного шума в аудитории при наличии и отсутствии мебели.

Измеренные графики затухания импульсов имеют линейный характер, параметр нелинейности ξ в большинстве случаев меньше 5 %. Наблюдается хорошее совпадение экспериментальных графиков затухания звука с результатами линейной аппроксимации. Отклонение уровней на графиках не превышает 3 дБ.

а



б

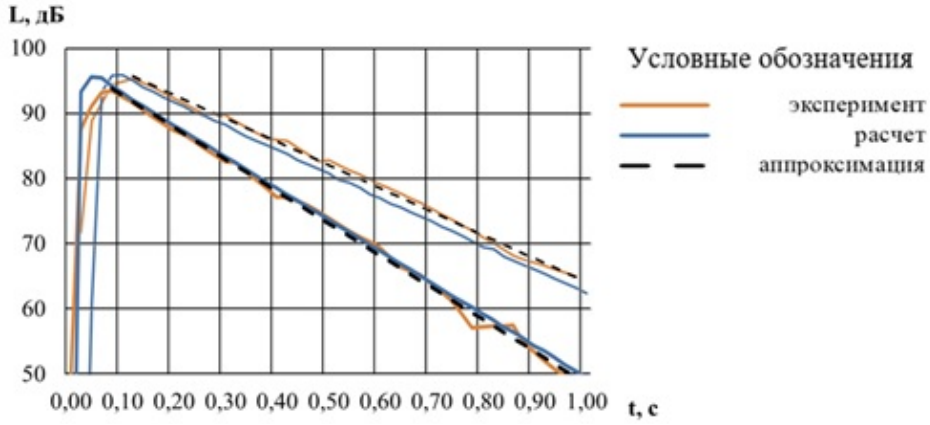


Рис. 3. Графики затухания импульса в помещении без мебели (1)
и с мебелью (2) при Δt = 0,05 с и T = 1 с:
а – измеренные; б – рассчитанные

Результаты исследований в помещении коридорного типа сложной формы. Исследования изменений во времени уровней звукового давления при действии импульсного источника шума выполнены в коридоре 2, схема которого дана на рис. 4. Пол коридора из керамической плитки, стены окрашены водоэмульсионной краской по штукатурке, потолок облицован звукопоглощающими плитами. Средние коэффициенты ограждений в коридоре в зависимости от частоты звука составляют от α=0,14 до 0,2. Исследование импульсного шума выполнено в 4 расчетных точках. Положение источника и расчетных точек Т1–Т4 приведено на рис. 4.

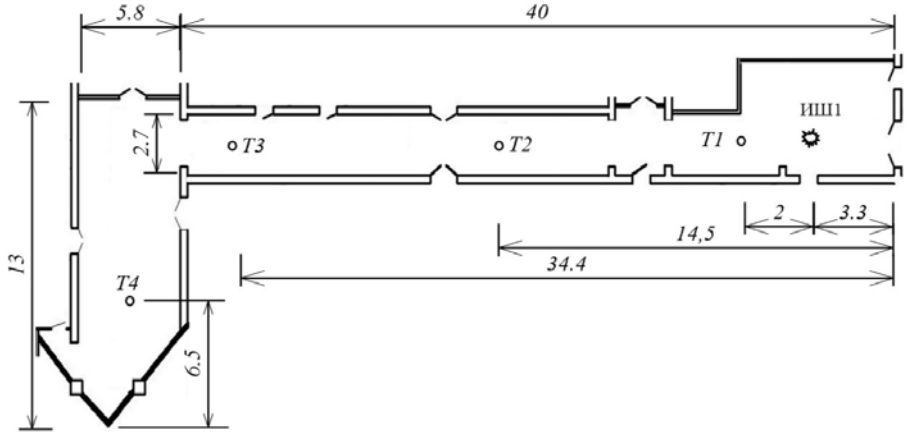


Рис. 4. Схема помещения с указанием положения расчётных точек
и положения источника шума (ИШ1)

Геометрические и акустические параметры коридора приведены в табл. 2. В таблице приведено два значения времени реверберации и коэффициента звукопоглощения, измеренные и рассчитанные по графикам реверберации в точках Т1 и Т3.

Таблица 2

Геометрические и акустические параметры коридора

Характеристика	Значение характеристики
Размеры помещения, м: длина; ширина высота	45,8 Переменная 3,2
Объем помещения, $м^3$	604
Площадь ограждений, $м^2$	782
Средняя длина свободного пробега, м	3,1
Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц	1000
Уровень акустической мощности источника шума, дБ	108
Время реверберации, с	0,7–1,0
Пространственный коэффициент поглощения звука в воздухе, $м^{-1}$	0,0012
Средний коэффициент звукопоглощения ограждений, α	0,18–0,12

Коридор входит в группу вытянутых помещений со значительной степенью несоразмерности. Малые по отношению к длине размеры поперечного сечения коридора приводят к значительным спадам уровней звука – до 28 дБ. На процессы распространения и изменения во времени импульсного шума оказывает влияние степень рассеивания звуковых волн при их отражениях от ограждений.

На рис. 5 приведены графики затухания импульсной энергии, построенные по экспериментальным данным. На рис. 6 приведены расчетные графики затухания при диффузном характере отражения звука и при зекрально-диффузном отражении.

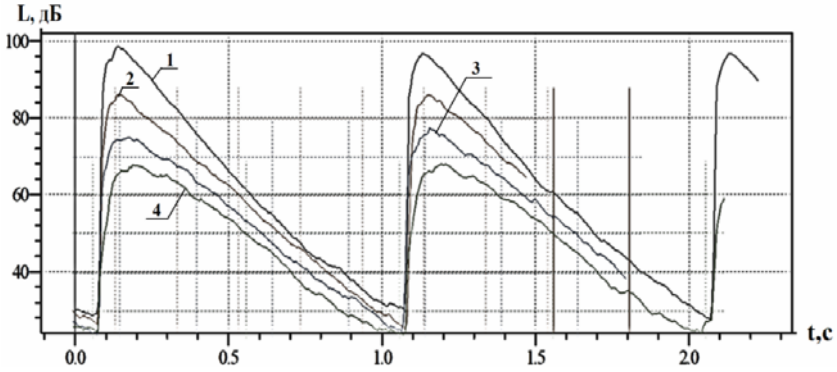


Рис. 5. Измеренные графики затухания импульса длительностью Δt = 0,05 с на различном расстоянии от источника шума.
На графиках цифрами обозначены номера расчетных точек

а б

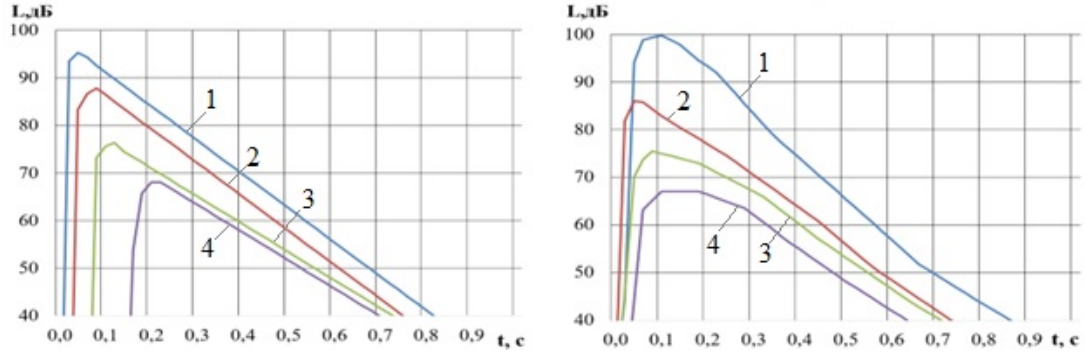


Рис. 6. Рассчитанные графики затухания импульса длительностьюΔt = 0,05 с на различном расстоянии от источника шума:
а – при диффузном отражении звука от ограждений; б – при зеркально-диффузном отражении звука (коэффициент рассеивания β = 0,4) в расчетных точках (обозначены цифрами)

Видно, что экспериментально полученные графики затухания звука в точке Т3 имеют два явно выраженных участка (см. рис. 5). Вблизи источника начальный участок затухания звука крутой, а затем более пологий. В дальних от источника точках в начале процесс затухания происходит относительно медленно, а затем он ускоряется и переходит в более крутое линейное снижения вплоть до перехода в фоновый шум. Это явление объясняется «перетеканием» после отключения источника накопившейся в зоне источника энергии (точка Т1) в дальнюю зону помещения, к которой относятся точки Т3 и Т4. Вследствие таких особенностей процесса реверберации в точке Т2 степень кривизны графика реверберации принимает отрицательное значение (табл. 3).

По результатам аппроксимации измеренных уровней шума время реверберации в точке Т3 составляет $T_{\text{ап3}}$= 1,0–1,3 с, что на 20–30 % больше, чем в точках Т1 и Т2. Соответственно средний коэффициент звукопоглощения на данном участке помещения по результатам измерения получается равным $\bar{\alpha}$ = 0,12 вместо $\bar{\alpha}$ = 0,18 для ближней зоны помещения.

Среднеквадратичное расхождение между измеренными и рассчитанными значениями графиков затухания звука составляет от 1,20 до 3,00 дБ, что приемлемо при выполнении практических расчетов на стадии проектирования шумозащитных мероприятий.

Таблица 3

Показатели линейности графиков реверберации в расчетных точках коридора

Номер точки	Коэффициенты линейной аппроксимации	Степень кривизны, ξ	Параметр нелинейности, C
Т1	a= 78,1 b = 98,5	10,9	3,28
Т2	a= 67,4 b = 85,9	1,8	-3,21
Т3	a= 60,0 b = 78,4	4,6	0,92
Т4	a= 57,1 b = 66,1	10,5	4,45

Общий вывод. Результаты сравнения расчётных и экспериментальных данных подтверждают возможность использования для расчёта импульсного шума предложенного комбинированного метода. Расхождения расчетных и экспериментальных данных по эквивалентным уровням звукового давления не превышают 3 дБ. Характер изменения во времени уровней звукового давления хорошо согласуется с данными затухания звуковой энергии, полученными при расчётах и экспериментах в различных по геометрическим и акустическим характеристикам помещениях. Обладая необходимой точностью и быстродействием, предложенный комбинированный метод может быть эффективно использован при оценке импульсного шумового режима помещений и разработке необходимых мер снижения шума.

Список литературы

1. Суворов, Г.А. Импульсный шум и его влияние на организм человека / Г.А. Суворов, А.М. Лихницкий. – Л.: Медицина, 2017. – 207 с.

2. Симухин, В.В. Медико-биологические эффекты импульсных шумов и особенности их гигиенического нормирования / В.В. Симухин, А.А. Ворона, А.В. Богомолов [и др.] // Безопасность в техносфере. – 2012. – Т.1, №6. – С. 36–43.

3. Рысин, Ю.С. О влиянии ненормированных параметров акустических сигналов и шумов на человека / Ю.С. Рысин // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т.9, №5. – С. 54–56.

4. Каньшин, В.Б. Исследование воздействия и рассмотрение методов снижения шумов импульсного характера на организм человека / В.Б. Каньшин // III Всесоюзная конференция по борьбе с шумом и вибрацией: материалы тезисов докладов секции «Действие шума и вибраций на организм». – Челябинск, 1980. – С. 24–27.

5. Calculation of impulse noise with mirror-diffuse reflection of sound from fences / A. Antonov, I. Matveeva, I. Shubin, I. Tsukernikov // Akustika. – 2019. – Vol. 34. – P. 90–105.

6. Антонов, А.И. Комбинированный метод расчёта импульсного шума в производственных зданиях с помещениями правильной геометрической формы / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев, М.А. Пороженко // Современная наука: теория, методология, практика: материалы IV Всероссийской национальной научно-практической конференции, Тамбов, 20–21 апреля 2022 года. – Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2022. – С. 90–95.

References

1. Suvorov, G.A. Pulse noise and its effect on the human body / G.A. Suvorov, A.M. Likhnitsky. – L.: Medicine, 2017. – 207 p.

2. Simukhin, V.V. Medico-biological effects of pulse noises and features of their hygienic rationing / V.V. Simukhin, A.A. Vorona, A.V. Bogomolov [et al.] // Safety in the technosphere. – 2012. – Vol.1, No.6. – P. 36–43.

3. Rysin, Yu.S. On the influence of abnormal parameters of acoustic signals and noise on humans / Yu.S. Rysin // T-Comm: Telecommunications and Transport. – 2015. – Vol. 9, No.5. – P. 54–56.

4. Kanshin, V.B. Investigation of the impact and consideration of methods for reducing impulse noise on the human body / V.B. Kanshin // III All-Union Conference on noise and vibration control: materials of the abstracts of the section «The effect of noise and vibrations on the body». – Chelyabinsk, 1980. – P. 24–27.

5. Calculation of impulse noise with mirror-diffuse reflection of sound from fences / A. Antonov, I. Matveeva, I. Shubin, I. Tsukernikov // Akustika. – 2019. – Vol. 34. – P. 90–105.

6. Antonov, A.I. Combined method for calculating pulse noise in industrial buildings with rooms of regular geometric shape / A.I. Antonov, O.A. Zhogoleva, V.I. Ledenev, M.A. Porozhenko // Modern science: theory, methodology, practice: materials of the IV All-Russian National Scientific and Practical conference, Tambov, April 20-21, 2022. – Tambov: Publishing House of IP Chesnokova A.V., 2022. – P. 90–95.