

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

№ 4(39), 2024

Т о м I.  
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета» продолжает традиции первого в Беларуси литературно-научного журнала «Месячник Полоцкий».*

---

---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия F. Строительство. Прикладные науки

В серии F научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области геодезии, геоэкологии, экологической безопасности строительства и городского хозяйства, строительства и архитектуры.

---

---

ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСИТЭТА  
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

У серыі F навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне і змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне геадэзіі, геаэкалогіі, экалагічнай бяспекі будаўніцтва і гарадской гаспадаркі, будаўніцтва і архітэктуры.

---

---

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY  
Series F. Civil engineering. Applied sciences

The F series of the scientific and theoretical journal publishes peer-reviewed articles containing new scientific results in the field of geodesy, geoecology, environmental safety of construction and urban economy, construction and architecture.

---

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Электронная версия номера размещена на сайте: <https://journals.psu.by/constructions>

Адрес редакции:  
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 59 95 41, e-mail: [vestnik@psu.by](mailto:vestnik@psu.by)

Отв. за выпуск: *А.М. Нияковский.*  
Редактор *А.А. Прадидова.*

Подписано к печати 27.12.2024. Бумага офсетная 70 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 12,90. Тираж 50 экз. Заказ 470.

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 697.9

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-2-12

## ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВОК С ТЕПЛООБМЕННЫМИ АППАРАТАМИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТИПА

*В.А. ЗАФАТАЕВ<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. Т.И. КОРОЛЁВА*  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)  
<sup>1)</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8058-2263>

*Предложен метод термоэкономической оптимизации вентиляционных установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа, позволяющий сравнивать показатели эффективности работы теплообменных аппаратов рекуперативного типа с различным оформлением поверхности теплообмена. Отмечается нецелесообразность выбора единственного обобщенного критерия оптимальности и вывода для него аналитического выражения из-за необходимости учета большого количества дискретно изменяющихся факторов и введения ограничений на них.*

**Ключевые слова:** теплообменный аппарат рекуперативного типа, показатели эффективности, фактор, термоэкономическая оптимизация, определяющая температура.

**Введение.** Тепловая энергия в конечном потреблении секторами национальной экономики Республики Беларусь занимает лидирующую позицию – ее доля в топливно-энергетическом балансе составляет около 33%, причем в конечном потреблении по жилищному сектору – 38%. Жилищный фонд составляет 98% от всех типов зданий в стране. Основным сырьем для производства тепловой энергии является природный газ, доля которого в структуре импорта составляет 41%. Доля природного газа, направляемого на получение тепловой и электрической энергии в Республике Беларусь, составляет 70%<sup>1</sup>.

Одним из основных видов оборудования, использующего тепловую энергию, являются теплообменные аппараты рекуперативного типа, применяемые в системах теплоснабжения и вентиляции. Высокая конкуренция производителей привела к появлению на мировом рынке большого количества типов теплопередающих поверхностей, форма которых по большей части определялась существующими технологиями производства, а не результатами исследования и моделирования теплообменных, гидро- и аэродинамических процессов.

Для сокращения потребления топливно-энергетических ресурсов, интенсификации теплопередачи, снижения гидравлических и аэродинамических потерь, инвестиционной и эксплуатационной составляющих издержек в установки с теплообменными аппаратами рекуперативного типа требуется определить такие наборы конструктивных, компоновочных, температурно-влажностных и динамических параметров, при которых системами теплоснабжения и вентиляции могут быть обеспечены нормируемые параметры среды у потребителя.

В связи с вышеизложенным, целью работы является разработка метода многокритериальной термоэкономической оптимизации установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа, осуществляющих теплообмен между потоками «газ-жидкость» и «газ-газ». Объектом исследования являются установки с теплообменными аппаратами рекуперативного типа для систем теплоснабжения и вентиляции. Предмет исследования – конструктивные, компоновочные, температурно-влажностные и динамические параметры установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа в системах теплоснабжения и вентиляции. Для достижения вышеуказанной цели должны быть решены следующие задачи [1–4]:

- 1) анализ топологии теплообменных схем и установок и определение критерия оптимизации;
- 2) выбор определяющих параметров и установление их влияния на критерий оптимизации;
- 3) составление математической модели установки;
- 4) определение метода поиска экстремума критерия оптимизации и выбор оптимальной стратегии исследования (особенно важно для схем со сложными связями между определяющими и определяемыми параметрами, которые не могут быть заданы аналитически).

Обоснование метода исследования представлено в настоящей статье ниже.

**Основная часть.** В работе [5] рассматриваются вопросы оптимизации теплообменного аппарата по приведенным затратам. В [6] приведены общие подходы в определении годовых переменных (стоимости всех потоков вещества и энергии, поступающих в систему) и постоянных энергоматериальных (капиталовложений, эксплуатационных) годовых затрат в расчете на единицу расходуемой эсэнергии.

<sup>1</sup> Энергетический баланс Республики Беларусь: статистический сборник. URL: [https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public\\_compilation/index\\_7863/](https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_compilation/index_7863/).

Критерий оптимальности теплообменного аппарата, приведенный в работах<sup>2,3</sup>, основан на использовании «взвешенных сумм». Каждый фактор умножается на положительный скалярный «вес», а затем все взвешенные факторы суммируются и образуют составную целевую функцию. Применительно к теплообменным аппаратам, с учетом требований, предъявленных к их режимным и конструктивным параметрам, критерий оптимальности будет иметь структуру:

$$Z_0 = g_1 \bar{G} + g_2 \bar{P} + g_3 \bar{V}, \quad (1)$$

где  $\bar{G}$  – безразмерный фактор, учитывающий затраты теплоносителя;  
 $\bar{P}$  – безразмерный фактор, учитывающий потери давления;  
 $\bar{V}$  – безразмерный фактор, учитывающий объемы (габариты) аппарата;  
 $g_1, g_2, g_3$  – коэффициенты весомости.

Для расчета коэффициентов весомости нужно оценить номинальное и предельно допустимое значения каждого частного фактора.

Безразмерные факторы, входящие в состав критерия, определяются по следующей, одинаковой для всех схеме:

$$\bar{K} = \frac{\pm K \mp K_{\text{нижн}}}{K_{\text{верхн}} - K_{\text{нижн}}}, \quad (2)$$

где  $K$  – конструктивный или режимный параметр процесса, соответствующий безразмерному фактору (знак определяется в зависимости от необходимости в уменьшении или увеличении данного фактора);

$K_{\text{верхн}}, K_{\text{нижн}}$  – соответственно верхний и нижний предел его изменения.

Метод взвешенных сумм представляется достаточно простым. С использованием вектора весов, задача многокритериальной оптимизации сводится к задаче оптимизации с одним критерием, которая решается с использованием широко известных алгоритмов и методов. Основная трудность при использовании такого подхода возникает при выборе весового коэффициента. Даже если значения исходных критериев имеют явный физический смысл, значению составной критериальной функции обычно нелегко придать очевидную физическую интерпретацию. Очевидно, наиболее целесообразный способ такой интерпретации – назначить значение составной критериальной функции так называемым «коэффициентом качества». Тогда метод взвешенных сумм – это просто ранжирование точек из допустимого множества в соответствии с их коэффициентом качества. Чем выше коэффициент качества, тем более предпочтительным будет решение. Конечно, успех интерпретации, связанный с коэффициентом качества, существенно зависит, от того, насколько веса соответствуют вкладу критериев в функцию качества.

Применение для оптимизации теплообменных аппаратов методов синтеза<sup>4,5</sup> [7; 8] нецелесообразно, т.к. в них не уделяется внимание поверочным расчетам. Методы синтеза предполагают введение допущений о противоточности теплообменных схем, постоянстве тепловых нагрузок, коэффициентов теплопередачи, гидравлических сопротивлений, отсутствия фазовых переходов в каждом теплообменном аппарате. Кроме того, в пластинчатых перекрестноточных утилизаторах теплоты рекуперативного типа теплоноситель в ячейке производит теплообмен с теплоносителем в двух соседних ячейках. Это обстоятельство неприемлемо для условий синтеза оптимальных теплообменных схем, где поток с расчетным тепловым потенциалом может контактировать только с одним потоком другого потенциала. Соединение теплообменных аппаратов по теплоносителю в большинстве случаев не предполагает вторичную рекуперацию охлажденного теплоносителя непосредственно у потребителя, что исключает возможность подбора оптимальной структуры схемы при матричном задании определяющих параметров.

Разработка математических моделей для анализа работы установок с теплообменными аппаратами и решение на их основе оптимизационных задач в некоторых случаях позволяет исключить необходимость проведения натурных экспериментов, сопряженных с большими затратами времени и материальных средств на их подготовку и проведение относительно получаемого эффекта оптимизации установки с теплообменными аппаратами. Метод математического моделирования широко применяется при разработке и проектировании теплоэнергетических установок. Превращению математического моделирования на ЭВМ в мощное средство исследования и анализа теплообменных установок способствовали преимущества этого метода, открывающие возможность исследования функционирования сложных энергетических объектов в любых установленных условиях. При этом внутренние параметры и показатели внешних влияющих факторов можно варьировать для получения любых условий, в том числе и не реализуемых в натурных условиях. Тем самым появляется возможность получения ответов на многие

<sup>2</sup> Туголуков Е.Н. Математическое моделирование термонагруженных процессов и аппаратов многоассортиментных химических производств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08, 05.13.18. – Тамбов, 2004. – 399 л.

<sup>3</sup> Демин А.А. Оптимизация систем рекуперации тепла газоперерабатывающих заводов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.13. – Киев, 1984. – 295 л.

<sup>4</sup> Барочкин Е.В. Анализ и оптимальный синтез теплообменных систем со сложной конфигурацией потоков в энергетических и химических комплексах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Иванов. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2008. – 308 л.

<sup>5</sup> Виноград Д.Л. Автоматизированный синтез схем ректификации с рекуперацией тепла на основе интегрально-гипотетического принципа: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. – М., 1984. – 225 л.

вопросы, возникающие на этапах разработки и предэскизного проектирования новых энергетических объектов (систем) без применения других, более сложных и дорогостоящих методов. Весьма важно, что в рамках используемой математической модели всегда гарантируется отыскание оптимальных решений [9]. С другой стороны, имеются задачи, для решения которых недостаточно всех вычислительных возможностей современной математики и техники, но которые достаточно эффективно могут быть решены с использованием физического моделирования. Однако следует помнить, что постановка эксперимента и обработка эмпирических данных становятся все более сложными и дорогостоящими. Экспериментальные данные не могут использоваться для оценки свойств проектируемого оборудования, особенно новых типов, поскольку в этом случае требуются значительное обобщение и экстраполяция результатов, носящих конкретный характер [10].

Математическая модель теплообмена представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных<sup>6</sup>. Существует множество приемов нахождения решений дифференциальных уравнений. Следует, однако, иметь в виду, что в практических задачах такие методы либо неприменимы вообще, либо приводят к решениям такой сложности, что затраты труда на их получение не оправданы. Последнее может быть обусловлено, к примеру, нелинейностью коэффициентов или функций, содержащихся в дифференциальном уравнении, или дискретностью их задания. Например, в работе<sup>7</sup> предпринята попытка математического моделирования теплообмена в воздушном перекрестноточном теплообменнике-утилизаторе рекуперативного типа с нахождением аналитического решения температурного поля в щелевых каналах, по которым проходят потоки удаляемого и приточного воздуха. Несмотря на принятые автором<sup>8</sup> допущения (плотность и теплопроводность влажного воздуха приняты постоянными; скорость потоков в продольном и поперечном направлениях щелевых каналов принята постоянной; профиль скорости принят симметричным относительно оси течения и однородным по ширине щелевого канала; внешняя кинетическая энергия потоков принята равной нулю; принят ламинарный режим движения воздуха в каналах), полученная система упрощенных дифференциальных уравнений не имеет аналитического решения по причине нелинейной зависимости искомых показателей от множества непрерывно изменяющихся, а также дискретных факторов. Необходимо отметить и то обстоятельство, что ввиду множества допущений и идеализаций выводимые функционалы критериев оптимальности зачастую имеют узкую область применения, ограниченную только той конструкцией теплообменного аппарата, для которой применим тип использованных уравнений<sup>9</sup> [11]. Поэтому получение аналитических выражений для целевых показателей функционирования установки с теплообменными аппаратами нецелесообразно из-за необходимости введения большого количества переменных и ограничений на них. Таким образом, для задач, которые не могут быть разрешены классическими методами, *обращение к численным методам решения является оправданным шагом*. Этот подход позволяет отказаться от упрощающих допущений, которые могли бы исказить качественное содержание выводов при сравнении показателей эффективности работы теплообменных аппаратов с различным оформлением поверхности теплообмена в типовом ряду моделей, не говоря о сравнении тех же показателей для разных конфигураций поверхностей теплообмена.

На практике получили распространение численные методы поиска оптимальных решений, основанные на установлении непосредственных зависимостей критериев оптимума от исходных параметров [12]. На первом этапе оптимизационной задачи следует однозначно задать тип теплообменного аппарата, конструктивные, компоновочные характеристики и значения непрерывно изменяющихся параметров. Этот подход позволяет избежать прерывистости функционала критерия оптимизации.

Непрерывно изменяющиеся параметры теплообменного аппарата – температура, давление, расход, длина труб, высота пластин, шаг накатки труб и др. В то же время диаметр труб, толщина ребер являются величинами с явно выраженным дискретным характером изменения, однако их можно считать непрерывно изменяющимися, округляя оптимальное значение до ближайшего дискретного значения. Дискретные признаки конструктивно-компоновочного типа теплообменного аппарата – коридорная или шахматная компоновка пучка труб, схема движения теплоносителей. Таким образом, в качестве критериев оптимума (показателей эффективности) при термодинамической оптимизации могут использоваться термодинамический и эксергетический КПД, потери эксергии, допустимая конечная температура потока, скорость потока, а при термоэкономической – годовые затраты на единицу эксергии или их переменная часть на создание и функционирование аппарата.

На втором этапе формируется множество вариантов конструкций теплообменных аппаратов, удовлетворяющих существующим условиям эксплуатации и ограничениям. В характерной для условий эксплуатации области факторного пространства варьируются заранее намеченные конструктивные, режимные параметры и их сочетания, и таким образом определяется их влияние на показатели эффективности теплообменного аппарата. В каждом случае фиксируются значения контролируемых независимых переменных, оптимизируемых параметров и критерия оптимальности. Выбор оптимальных вариантов конструкции установки осуществляется либо методом прямого упорядочивания вариантов по критерию оптимальности (для непрерывно изменяющихся параметров), либо методом анализа вариантов по комплексу показателей эффективности (дискретные величины), характеризующих различные стороны совершенства конструкций установок с теплообменными аппаратами. Например, при выборе термоэкономически оптимальной степени обребрения теплопередающей поверхности необходимо задавать постоян-

<sup>6</sup> Белоногов Н.В. Пути совершенствования пластинчатых перекрестноточных рекуперативных теплообменников: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.03, 01.04.14. – СПб., 2005. – 204 л.

<sup>7</sup> См. сноску 6.

<sup>8</sup> См. сноску 6.

<sup>9</sup> Бекманис И.В. Разработка методики оптимизации рекуперативных теплообменников по обобщенным характеристикам и средней скорости потока: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. – Рига, 1984. – 195 л.

ными габариты проходного сечения установки, длину труб одного хода, определяющие температуры греющей и подогреваемой среды, температуру отсчета эксергии, оптимальную скорость набегающего потока в сжатом сечении, годовое число часов и неравномерность эксплуатации установки, потери давления по обоим теплоносителям на входе в установку, величины тарифов на электро- и тепловую энергию, отчисления на закупку и монтаж установки и нагнетательных устройств. Варьируемыми определяющими параметрами могут выступать шаг труб, число поперечных рядов труб, шаг ребер, их толщина и высота, толщина стенок трубок [3; 4; 13; 14].

Математическая модель теплообмена в установках с теплообменными аппаратами должна строиться в виде блочно-иерархического алгоритма, в соответствии с которым части расчета, которые пригодны для конкретных конструкций, но не являются универсальными, оформляются в виде подпрограмм (модулей). Принцип блочности позволяет легче совершенствовать и обновлять математическую модель теплообмена в соответствии с новыми достижениями в науке и технике. Обзор существующих методов сравнения и оптимизации теплообменных аппаратов [15] показал, что большинство из них представляют собой сочетания подалгоритмов (модулей) теплового, гидравлического и прочностного расчетов различной степени сложности для отдельных классов теплообменного оборудования (ТО). Это затрудняет сравнение ТО разных классов по термоэкономической эффективности. Кроме того, отдельные модули расчета содержатся не во всех алгоритмах, а структура экономической оценки недостаточно полна.

Для удовлетворения принципа универсальности математической модели *предложен алгоритм поперечного интервально-итерационного расчета*, составляющий основу метода термоэкономической оптимизации, позволяющего определять обобщенные и локальные показатели термодинамической и экономической эффективности установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа. Согласно этому методу расчета теплообменный аппарат рассматривается как гетерогенная среда, а геометрическая характеристика назначается для его функционального объема, где производится усреднение локальных характеристик. Далее анализ эффективности теплообменного аппарата проводится по усредненным значениям. Этот способ позволяет более корректно оценивать влияние геометрии поверхности теплообмена на общую эффективность теплообменного аппарата, чем при использовании обобщенных характеристик теплообмена.

Для удобства ведения автоматизированных расчетов на базе рассматриваемой математической модели подвергнуты аппроксимации в виде аналитических выражений табличные данные теплофизических свойств теплоносителей, поправочный коэффициент на угол атаки потоком поверхности теплообмена, закупочные цены и единовременные затраты на строительные-монтажные работы для устанавливаемого оборудования.

Предлагаемая последовательность поперечного интервально-итерационного расчета теплообменных аппаратов рекуперативного типа представлена ниже.

**Пункт 1.** Исходные данные: размеры корпуса  $A_{\text{фронт}}$ ,  $B_{\text{фронт}}$  аппарата, две температуры из набора  $t_1', t_1'', t_2', t_2''$  (как правило, начальные температуры греющего  $t_1'$  и нагреваемого  $t_2'$  теплоносителей), температура отсчета эксергии, давления греющего  $P_1$  и нагреваемого  $P_2$  теплоносителей на входе, схема взаимного движения теплоносителей, оптимальная скорость одного из теплоносителей, компоновка пучка труб, величины тарифов на электро- и тепловую энергию, отчисления на закупку и монтаж установки и нагнетательных устройств, годовое число часов и неравномерность эксплуатации установок, геометрия теплопередающих элементов:

– для **теплообменных аппаратов с кольцевым оребрением** (рисунок 1): наружный диаметр  $d_0$  и длина труб одного хода  $L_{\text{трубки}}$ , число ходов теплоносителя, продольный и поперечный шаги труб  $S_1, S_2$ , число поперечных рядов труб  $z_p$ , шаг ребер  $S$ , их толщина  $\Delta_r$  и высота  $h_r$ , толщина стенок трубок  $\delta_1, \delta_2$ .

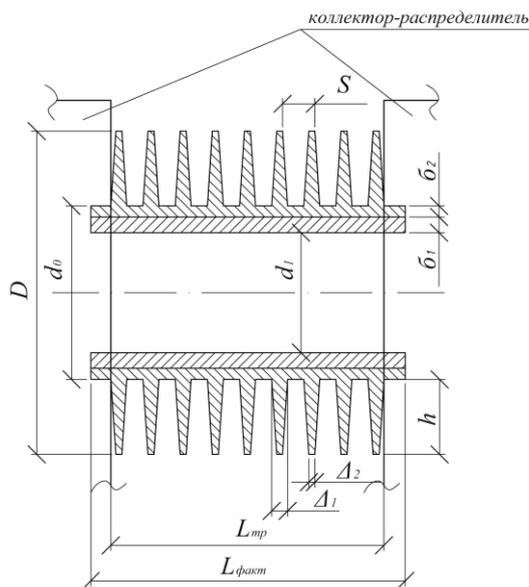


Рисунок 1. – Трубка с оребрением в виде колец

Исследовались термоэкономические характеристики трех типов оребрения шахматных пучков, наиболее часто встречающиеся на практике –  $\varphi_{ор} = 9,4$ ;  $\varphi_{ор} = 15,2$ ;  $\varphi_{ор} = 20,0$ <sup>10,11</sup>. Параметры оребрения представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры оребрения трубок в виде колец

Степень оребрения, $\varphi_{ор}$	9,4	15,2	20,0
Шаг ребер $S$ , мм	3,5	3,0	2,5
Высота ребер $h$ , мм	10,5	14,0	15,0
Толщина ребра у основания $\Delta_1$ , мм	0,85	0,7	0,6
Наружный диаметр трубы без учета высоты ребер $d_0$ , мм	28	27	27
Наружный диаметр трубы с учетом высоты ребер $D$ , мм	49	56	57
Толщина стенки стальной трубы $\delta_1$ , мм	1	1	0,45
Толщина стенки алюминиевой трубы $\delta_2$ , мм	0,6	0,6	0,3
Поперечный шаг трубок $S_1$ , мм	52	58	59
Продольный шаг трубок $S_2$ , мм	45	50,2	51,1

Варьируемыми параметрами являлись шаг ребер  $S$ , толщина стенок стальной  $\delta_1$  и алюминиевой  $\delta_2$  труб, поперечный  $S_1$  и продольный  $S_2$  шаги труб в пучке, высота  $h$  и толщина ребер  $\Delta_1, \Delta_2$ .

– для теплообменных аппаратов с профильными листами оребрения в виде синусоиды (рисунок 2): угол раскрытия гофр  $\gamma$ , основание сектора  $b$  или шаг гофрировки  $S_R$ , поперечная разбежка гофр  $a$ , размеры фронтального сечения  $A_{фронт}$ ,  $B_{фронт}$ ,  $H$ , наружный диаметр трубок  $d_0$ , толщина стенки труб  $\delta_1$  и толщина пластин  $\Delta$ , шаг установки пластин  $S$ , продольный и поперечный шаги труб  $S_1, S_2$ , число поперечных рядов труб  $z_p$ .

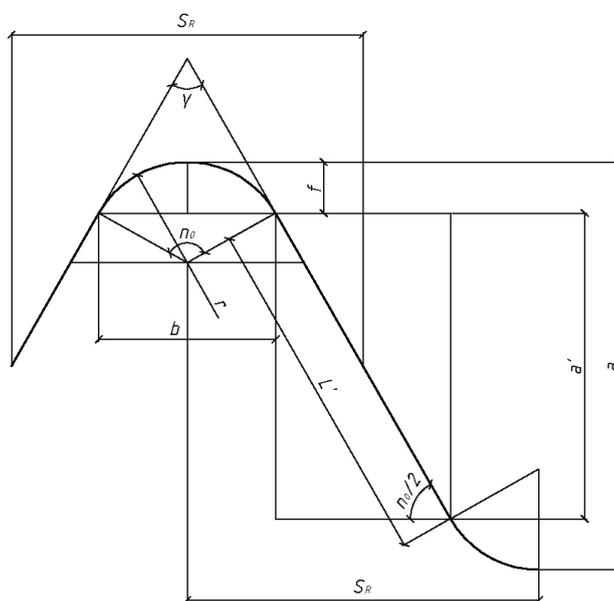


Рисунок 2. – Фрагмент профильного штампованного листа, изогнутого в виде синусоиды

– для теплообменных аппаратов с профильными листами оребрения в виде трапеции или треугольника (рисунок 3): угол раскрытия гофр  $\gamma$ , малое основание трапеции  $b$  (для треугольных гофр  $b = 0$ ), поперечная разбежка гофр  $a'$ , размеры фронтального сечения  $A_{фронт}$ ,  $B_{фронт}$ ,  $H$ , наружный диаметр трубок  $d_0$ , толщина стенки труб  $\delta_1$  и толщина пластин  $\Delta$ , шаг установки пластин  $S$ , продольный и поперечный шаги труб  $S_1, S_2$ , число поперечных рядов труб  $z_p$ .

<sup>10</sup> Пиир А.Э. Исследование и разработка эффективных воздухонагревателей из биметаллических ребристых труб для химико-лесного комплекса: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04. – Архангельск, 2002. – 315 л.

<sup>11</sup> Веринчук Е.В. Моделирование процессов тепло- и массопереноса в рекуперативных конденсационных теплоутилизаторах: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. – М., 2004. – 136 л.

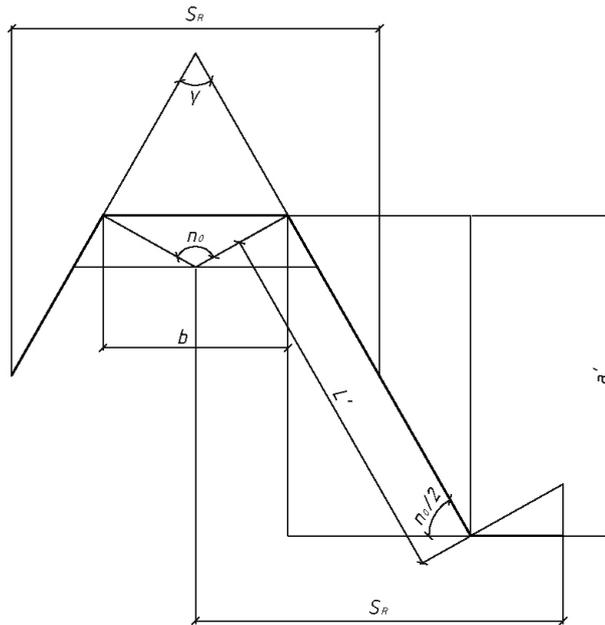


Рисунок 3. – Фрагмент профильного штампованного листа, изогнутого в виде трапеции

Конструктивные особенности теплообменных аппаратов с оребрением из профильного листа представлены в работе [16]. Размеры обечайки  $A_{\text{фронт}} = 905$  мм,  $B_{\text{фронт}} = 503$  мм,  $H = 80$  мм (три поперечных ряда трубок),  $H = 100$  мм (4 поперечных ряда трубок), поперечный шаг трубок  $S_1 = 50$  мм, продольный шаг  $S_2 = 25$  мм, наружный диаметр медных трубок  $d_0 = 12$  мм, толщина стенки трубки  $\delta_1 = 0,4$  мм, шаг оребрения  $S$  принят равным 1,8; 2,0; 2,5 и 4,5 мм, толщина листа оребрения  $\Delta = 0,2$  мм, число ходов по горячей воде принимается  $z_{\text{ход}} = 2; 4; 6; 8; 10$ . Технологически оптимальная скорость воды  $w_{\text{воды}} = 0,8-1,5$  м/с.

Рассчитаны теплогидравлические и термоэкономические характеристики синусоидальных профильных листов оребрения с поперечной разбежкой гофр 4 мм, шагом оребрения 1,8, 2,5 и 4,5 мм. Угол раскроя гофр  $\gamma = 90^\circ$  и число ходов по воде  $z_{\text{ход}} = 6$  не изменялись. Также рассчитаны теплогидравлические и термоэкономические характеристики синусоидальных профильных листов оребрения с поперечной разбежкой гофр 4 мм, шагом оребрения 4,5 мм, число ходов по воде  $z_{\text{ход}} = 6$ . Увеличивался угол раскроя гофр  $\gamma$  с  $90^\circ$  до  $150^\circ$ .

– для теплообменных аппаратов с оребрением трубок в виде сплошных плоских листов (рисунок 4): размеры фронтального сечения полезного пространства утилизатора  $A_{\text{фронт}}$ ,  $B_{\text{фронт}}$ ,  $H$ , наружный диаметр трубок  $d_0$ , толщина пластин  $\Delta$ , шаг установки пластин  $S$ , поперечный  $S_1$  и продольный  $S_2$  шаги трубок, расстояние от края пластины оребрения до лобовой точки ближайшей по ходу воздуха трубки  $h_1$ .

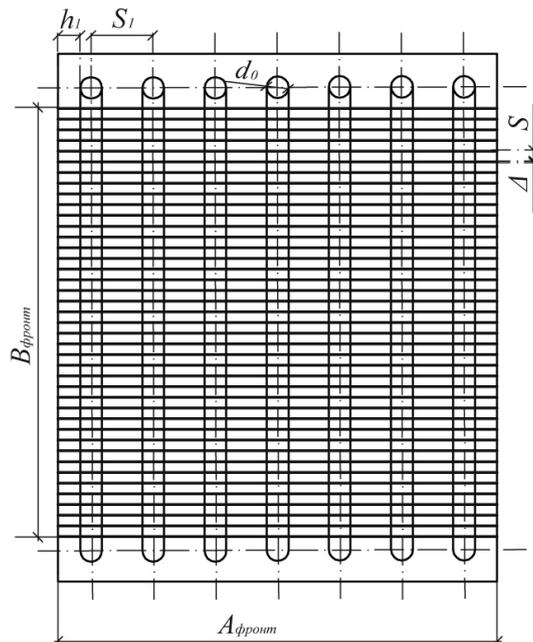


Рисунок 4. – Фронтальный вид пучка с оребрением трубок в виде сплошных плоских листов

Характеристики исследованного пучка: материал трубок и оребрения – алюминий, размеры фронтального сечения полезного пространства теплоутилизатора  $A_{\text{фронт}} = 270$  мм,  $B_{\text{фронт}} = 350$  мм,  $H = 180$  мм, наружный диаметр трубок  $d_0 = 12,6$  мм, толщина пластин  $\Delta = 0,2$  мм, шаг установки пластин  $S = 2,6$  мм, поперечный  $S_1 = 33,4$  мм и продольный  $S_2 = 29$  мм шаги трубок, расстояние от края пластины оребрения до лобовой точки ближайшей по ходу воздуха трубки  $h_1 = 8$  мм.

**Пункт 2.** Расчет недостающих величин.

**Пункт 2а.** Определяются площади живых сечений, а также габаритные размеры и площади конструктивных элементов поверхности теплообмена (по исходным данным пункта 1 на основании геометрической модели).

**Пункт 2б.** В первом приближении задается конечная температура нагреваемого теплоносителя  $t_2''$ .

**Пункт 3.** Задается в первом приближении температуры стенок  $t_{w1}, t_{w2}$ , причем  $t_1' > t_{w1} > t_{w2} > t_2''$ .

**Пункт 4.** Расчет определяющих температур: в первой итерации в качестве определяющих температур принимаются температуры на горячем конце теплообменного аппарата ( $t_1'$  и  $t_2''$  при выборе противоточной или перекрестноточной схем движения теплоносителей).

**Пункт 5.** Расчет теплофизических свойств теплоносителей: в первой итерации  $\nu, \rho, \mu, \lambda, Pr, c_p$  определяются по  $t_1'$  и  $t_2''$ . Для последующих итераций определяются  $\nu, \rho, \mu, \lambda, Pr, c_p$  по  $t_1''$  и  $t_2'$ . Здесь  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°К);  $Pr$  – критерий Прандтля;  $c_p$  – удельная массовая изобарная теплоемкость, Дж/(кг·°К).

**Пункт 6.** Проверка допустимости скоростей: работа итерационного алгоритма проходит при задании оптимального значения скорости одного из теплоносителей, которая, как правило, известна из опыта эксплуатации. Проверяется расчетом допустимость скорости второго теплоносителя, исходя из данных пункта 2. Если скорость недопустима – возврат к пункту 1 и изменение геометрии теплопередающего элемента.

**Пункт 7.** Расчет коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1, \alpha_2$  и теплопередачи  $k_1', k_2'$  на горячем конце теплообменного аппарата. Для последующих итераций рассчитываются коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1, \alpha_2$  и теплопередачи  $k_1'', k_2''$  и на холодном конце теплообменного аппарата по  $t_1''$  и  $t_2'$ .

**Пункт 8.** Расчет неизвестных концевых температур.

**Пункт 8а.** Определение теплопроизводительности в первом приближении:

$$Q = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2'' - t_2') = W_2 \cdot (t_2'' - t_2')$$

или

$$Q = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1' - t_1'') = W_1 \cdot (t_1' - t_1''). \quad (3)$$

Здесь  $G$  и  $W$  – массовые расходы, кг/с, и водяные эквиваленты, Вт/°К, теплоносителей соответственно.

**Пункт 8б.** Определение средней тепловой нагрузки  $Q_z$  характерных зон (интервалов  $z$ ) [17; 18] и площади их поверхности теплообмена  $F_{2z}$ :

$$Q_z = \frac{Q}{z_{\text{ход}}}; \quad F_{2z} = \frac{F_{\text{полн}}}{z_{\text{ход}}};$$

$$(t_{2z1}'' - t_2') \cdot W_2 = Q_z = k_2 \cdot F_{2z} \cdot (\overline{t_{1zi}} - \overline{t_{2zi}})$$

или

$$(t_1' - t_{1z1}'') \cdot W_1 = Q_z = k_2 \cdot F_{m.o.z} \cdot (\overline{t_{1zi}} - \overline{t_{2zi}}). \quad (4)$$

**Пункт 8в.** Расчет температуры подогреваемого теплоносителя на выходе из каждого интервала  $z$ :

$$t_{2(z+1)}'' = t_{2z}'' + \frac{Q_z}{W_2}$$

или

$$t_{1z(i+1)}'' = t_{1zi}'' - \frac{Q_z}{W_1}. \quad (5)$$

**Пункт 8г.** Осреднение температуры подогреваемого теплоносителя по каждому интервалу:

$$\overline{t_{2z}} = 0,5 \cdot (t_{2z}' + t_{2z}'')$$

или

$$\overline{t_{1zi}} = 0,5 \cdot (t_{1zi}' + t_{1zi}''). \quad (6)$$

**Пункт 8д.** Расчет температуры греющего теплоносителя на выходе каждого интервала z:

$$t_{1z}'' = \frac{W_1 \cdot t_{1z}' + k_2 \cdot F_{2z} \cdot \overline{t_{2z}} - k_2 \cdot F_{2z} \cdot \frac{t_{1z}'}{2}}{W_1 + \frac{k_2 \cdot F_{2z}}{2}}$$

или

$$t_{2zi}'' = \frac{W_2 \cdot t_{2zi}' + k_2 \cdot F_{то.з} \cdot \left( \overline{t_{1zi}} - \frac{t_{2zi}'}{2} \right)}{W_2 + \frac{k_2 \cdot F_{то.з}}{2}}. \quad (7)$$

**Пункт 8е.** Осреднение температуры греющего теплоносителя по каждому интервалу:

$$\overline{t_{1z}} = 0,5 \cdot (t_{1z}' + t_{1z}''). \quad (8)$$

**Пункт 9.** Задаются определяющие температуры второго приближения:

$$t_1 = \frac{t_1' + t_1''}{2}; \quad t_2 = \frac{t_2' + t_2''}{2}. \quad (9)$$

**Пункт 10.** По заданным определяющим температурам второго приближения последовательно выполняются пункты 3–7 алгоритма. Цель – нахождение уточненных значений  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ . При этом уточнение температур стенок  $t_{w1}$  и  $t_{w2}$ , заданных в пункте 3, пока не производится – задаются их новые ориентировочные значения. В дальнейших итерациях они будут уточняться путем подбора вручную.

**Пункт 11.** Расчет температур стенки в интервалах z по определенным во втором приближении значениям  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ :

$$\overline{t_{w1z}} = \overline{t_{1z}} - \frac{k_2 \cdot (\overline{t_{1z}} - \overline{t_{2z}})}{\alpha_1}; \quad \overline{t_{w2z}} = \overline{t_{2z}} + \frac{k_2 \cdot (\overline{t_{1z}} - \overline{t_{2z}})}{\alpha_2}. \quad (10)$$

**Пункт 12.** Уточнение температур стенок, заданных в пункте 3. Ориентировочные значения этих температур рассчитываются с использованием определяющих температур пункта 9 по формулам:

$$t_{w1} = t_1 - \frac{k_2 \cdot (t_1 - t_2) \cdot F_{то}}{\alpha_1 \cdot F_{внутр}}; \quad t_{w2} = t_2 + \frac{k_2 \cdot (t_1 - t_2)}{\alpha_2}. \quad (11)$$

Если расчет теплообмена производится для условий выпадения конденсата из парогазовой смеси, в работу включается третий этап алгоритма с расчетом температур парогазовой смеси после выпадения из нее конденсата, последовательность выполнения которого приведена в работах [19; 20]. Уточнение температур  $t_1$  парогазовой смеси с учетом скрытой теплоты конденсации можно произвести расчетно-графическим путем [21; 22] или методом последовательных приближений.

По итогам расчета получаются новые (окончательные) значения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи, учитывающие выпадение конденсата из парогазовых смесей. Для условий теплообмена без выпадения конденсата – переход к пункту 13.

**Пункт 13.** Расчет коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и теплопередачи  $k_1''$ ,  $k_2''$  на холодном конце теплообменного аппарата (по  $t_1''$  и  $t_2'$  при выборе противоточной или перекрестноточной схем движения теплоносителей).

**Пункт 14.** Расчет определяющих температур  $t_1$  и  $t_2$ . Расчет проводят по заданным  $t_1'$  и  $t_2'$  и найденным  $t_1''$  и  $t_2''$ , а также найденным  $k_2'$  на горячем и  $k_2''$  на холодном концах теплообменного аппарата. Возврат к пункту 3 и выполнение расчета до пункта 7 включительно, где коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи рассчитываются по  $t_1$  и  $t_2$ .

**Пункт 15.** Гидравлический расчет. Если потери давления превышают допустимые, – возврат к пункту 1 и изменение геометрии теплопередающего элемента.

**Пункт 16.** Расчет показателей эффективности.

**Пункт 17.** Сравнение теплообменных аппаратов по комплексу показателей эффективности.

Работа алгоритма реализована в СУБД MS Excel и фактически сводится к вводу исходных данных согласно пункту 1 первого этапа алгоритма и подбора вручную температур  $t_{w1}$ ,  $t_{w2}$  первого этапа алгоритма, определяющей температуры  $t_1$  второго этапа алгоритма и температур  $t_{ctf}$ ,  $t_{w1}$ ,  $t_{w2}$ ,  $t_2''$  третьего этапа алгоритма.

Проверка адекватности математической модели осуществлена на примере работы агрегата вентиляционного теплоутилизационного (АВТУ), конструктивное исполнение которого предусматривает противоточный теплообменник-утилизатор рекуперативного типа с пластинчатым оребрением<sup>12</sup>. Результаты экспериментального определения температуры удаляемого воздуха  $t_1''$  согласуются с рассчитанными по предложенному методу термоэкономической оптимизации с относительной ошибкой не более 5,1% (при работе по дисбалансу экспериментально получено  $t_1'' = 16,0$  °С, расчетное значение  $t_1'' = 16,4$  °С; при работе по балансу экспериментально получено  $t_1'' = 9,3$  °С, расчетное значение  $t_1'' = 9,8$  °С). Небольшое расхождение опытных данных с теоретическими обусловлено отсутствием тепловой изоляции на воздуховодах установки АВТУ, а также присутствием инструментальной и методической составляющих погрешности.

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Разработан метод термоэкономической оптимизации, позволяющий определять обобщенные и локальные показатели термодинамической и экономической эффективности установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа для режимов теплообмена без выпадения конденсата и с выпадением конденсата в одном из теплоносителей.

2. Разработанный метод предусматривает варьирование геометрических характеристик элементов оребрения теплообменных поверхностей с последующим определением и сравнением для каждой компоновки показателей термодинамической и экономической эффективности.

3. Предлагаемый метод может быть использован при:

- определении энергоэффективности установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа при их эксплуатации в составе систем теплоснабжения и вентиляции;
- оптимизации конструктивных, компоновочных, температурно-влажностных, динамических и экономических параметров функционирования теплообменных аппаратов рекуперативного типа в составе систем теплоснабжения и вентиляции, которые позволят обеспечить наименьший расход тепловой и электрической энергии при экономически оправданных финансовых вложениях;
- подборе теплообменных аппаратов рекуперативного типа из модельного ряда;
- разработке технологических режимных карт работы установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа в составе систем теплоснабжения и вентиляции;
- выявлении возможности конденсации влаги в газообразном теплоносителе в теплоутилизаторах рекуперативного типа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Гурьева Л.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 191 с.
2. Зафатаев В.А. Постановка и решение оптимизационной задачи калориферной установки на основе эксерго-экономического метода // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр.-во. Приклад. науки. – 2012. – № 16. – С. 93–101.
3. Hancharou E.I., Zafatayeu V.A. Exergy application limits // European & National Dimension in Research: materials of the conference / Novopolotsk (28–29 апр. 2010 г.) / Полоц. гос. ун-т; редкол.: Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов [и др.]. – Новополоцк, 2010. – С. 69–71.
4. Karaliouva T.I., Zafatayeu V.A. Thermo-economic optimization theory application to heat exchange process // European and National Dimension in Research: materials of the conference / Novopolotsk (27–28 апр. 2011 г.) / Полоц. гос. ун-т; редкол.: Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов [и др.]. – Новополоцк, 2011. – С. 66–69.
5. Лapidус А.С. Экономическая оптимизация химических производств. – М.: Химия, 1986. – 207 с.
6. Нитч Р. К эксергетической теории формирования затрат // Энергия и эксергия: сб. ст.; под ред. В.М. Бродянского. – М.: Мир, 1968. – С. 94–105.
7. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. – М.: Химия, 1969. – 566 с.

<sup>12</sup> Агрегат вентиляционный теплоутилизационный [Электронный ресурс] // Каталог вентиляционного оборудования ООО «Внедренческое предприятие Альтернатива». – URL: <https://www.maxaero.by/katalog-produkcii/oborudovanie-dlya-ventilyacii/pritochnye-ustanovki/agregaty-ventilyacionnye-teploutilizacionnye-avtu>.

8. Ibrić N., Fu C., Gundersen T. Simultaneous Optimization of Work and Heat Exchange Networks // *Energies*. – 2024. – № 17(7). DOI: 10.3390/en17071753.
9. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. – М.: Энергия, 1978. – 416 с.
10. Бойко Е.А. Применение ЭВМ для решения теплоэнергетических задач. – Красноярск: Сиб. промысел, 2001. – 202 с.
11. Оносовский В.В. Моделирование и оптимизация холодильных установок. – Л.: Изд-во ЛУ, 1990. – 208 с.
12. Андриющенко А.И. Оптимизация тепловых циклов и процессов ТЭС. – М.: Высш. шк., 1974. – 280 с.
13. Heat Transfer Simulation and Structural Optimization of Spiral Fin-and-Tube Heat Exchanger / H. Jiang, T. Jiang, H. Tian et al. // *Electronics*. – 2024. – № 13(23). DOI: 10.3390/electronics13234639.
14. Farzin A., Mehran S., Salmalian K. Thermodynamic and Economic Optimization of Plate-Fin Heat Exchangers Using the Grasshopper Optimization Algorithm // *International Journal of Thermodynamics*. – 2024. – № 27(2). – P. 1–9. DOI: 10.5541/ijot.1285479.
15. Каневец Г.Е. Обобщённые методы расчета теплообменников. – Киев: Навук. думка, 1979. – 351 с.
16. Бялый Б.И. Теплообменное оборудование воздухообрабатывающих установок ООО «ВЕЗА». – М.: Инфорт, 2005. – 280 с.
17. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. – М.: Машиностроение, 1989. – 367 с.
18. Sousa D.L., Balmant W. Parametric evaluation of heat recovery in a recuperative heat exchanger // *Revista De Engenharia Térmica*. – 2024. – № 22(3). – P. 25–33. DOI: 10.5380/reterm.v22i3.94668.
19. Зафатаев В.А. Выбор геометрического исполнения профильного листа оребрения для воздухоподогревателей из труб // *Архитектура, Строительство, Транспорт: сб. материалов Междунар. НПК / Омск (2–3 дек. 2015 г.)*. – Омск: Сиб. гос. автомоб.-дорож. академия, 2015. – С. 258–263.
20. Королёва Т.И., Зафатаев В.А. Термодинамическое обоснование утилизации теплоты дымовых газов в конденсационных теплоутилизаторах на примере котельной «5-й полк» г. Витебска // *Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электрон. сб. ст. междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та / редкол.: А.А. Бакалович, Л.М. Парфёнова*. – Новополоцк, 2018. – С. 418–425.
21. Королёва Т.И., Зафатаев В.А. Проверка условия конденсации влаги в воздушном теплоутилизаторе рекуперативного типа // *Строительство-2016: сб. материалов II Брянь. междунар. инновац. форума / Брянск (1 дек. 2016 г.) / редкол.: А.В. Городков, З.А. Мевлидинов [и др.]*. – Брянск: Брян. гос. инженер.-технол. ун-т, 2016. – Т. 2. – С. 51–54.
22. Зафатаев В.А. Определение возможности конденсации влаги в воздушном пластинчатом утилизаторе теплоты рекуперативного типа // *Инновационные технологии в промышленности: образование, наука, производство: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. / Стерлитамак (16 дек. 2016 г.) / редкол.: В.В. Пряничникова, И.В. Овсянникова [и др.]*. – Стерлитамак: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т. Филиал ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Стерлитамаке, 2016. – С. 326–328.

## REFERENCES

1. Kafarov, V.V., Meshalkin, V.P. & Gur'eva, L.V. (1988). *Optimizatsiya teploobmennyykh protsessov i sistem*. Moscow: Energoatomizdat. (In Russ.).
2. Zafataev, V.A. (2012). Postanovka i reshenie optimizatsionnoi zadachi kalorifernoi ustanovki na osnove eksergoekonomicheskogo metoda [Formulation and solution of the optimization problem of a heating unit based on the exergo-economic method]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F. Civil engineering. Applied Sciences]*, (16), 93–101. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Hancharou, E.I. & Zafatayeu, V.A. (2010). Exergy application limits. *European & National Dimension in Research: materials of the conference / Novopolotsk (28–29 apr. 2010 g.)* (69–71). Novopolotsk: Polotsk State University.
4. Karaliova, T.I. & Zafatayeu, V.A. (2010). Thermo-economic optimization theory application to heat exchange process. *European & National Dimension in Research: materials of the conference / Novopolotsk (27–28 apr. 2011 g.)* (66–69). Novopolotsk: Polotsk State University.
5. Lapidus, A.S. (1986). *Ekonomicheskaya optimizatsiya khimicheskikh proizvodstv*. Moscow: Khimiya. (In Russ.).
6. Nitch, R. (1968). К эксергетической теории формирования затрат. In V.M. Brodyanski (Eds.). *Energiya i eksergiya: sb. st.* (94–105). Moscow: Mir. (In Russ.).
7. Boyarinov, A.I. & Kafarov, V.V. (1969). *Metody optimizatsii v khimicheskoi tekhnologii*. Moscow: Khimiya. (In Russ.).
8. Ibrić, N., Fu, C., & Gundersen, T. (2024). Simultaneous Optimization of Work and Heat Exchange Networks. *Energies*, 17(7). DOI: 10.3390/en17071753.
9. Popyrin, L.S. (1978). *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teploenergeticheskikh ustanovok*. Moscow: Energiya. (In Russ.).
10. Boiko, E.A. (2001). *Primenenie EVM dlya resheniya teploenergeticheskikh zadach*. Krasnoyarsk: Sib. promysel. (In Russ.).
11. Onosovskii, V.V. (1990). *Modelirovanie i optimizatsiya kholodil'nykh ustanovok*. Leningrad: Izd-vo LU. (In Russ.).
12. Andryushchenko, A.I. (1974). *Optimizatsiya teplovykh tsiklov i protsessov TES*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
13. Jiang, H., Jiang, T., Tian, H., Wu, Q., Deng, C., & Zhang, R. (2024). Heat Transfer Simulation and Structural Optimization of Spiral Fin-and-Tube Heat Exchanger. *Electronics*, 13(23). DOI: 10.3390/electronics13234639.
14. Farzin, A., Mehran, S., & Salmalian, K. (2024). Thermodynamic and Economic Optimization of Plate-Fin Heat Exchangers Using the Grasshopper Optimization Algorithm. *International Journal of Thermodynamics*, 27(2), 1–9. DOI: 10.5541/ijot.1285479.
15. Kanevets, G.E. (1979). *Obobshchennyye metody rascheta teploobmennikov*. Kyiv: Navuk. dumka. (In Russ.).
16. Balyi, B.I. (2005). *Teploobmennoye oborudovanie vozdukhooobrabatyvayushchikh ustanovok ООО «ВЕЗА»*. Moscow: Infort. (In Russ.).
17. Bazhan, P.I., Kanevets, G.E. & Seliverstov, V.M. (1989). *Spravochnik po teploobmennym apparatam*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.).
18. Sousa, D.L. & Balmant, W. (2024). Parametric evaluation of heat recovery in a recuperative heat exchanger. *Revista De Engenharia Térmica*, 22(3), 25–33. DOI: 10.5380/reterm.v22i3.94668
19. Zafataev, V.A. (2015). Vybór geometricheskogo ispolneniya profil'nogo lista orebreniya dlya vozdukhopodogrevatelei iz trub. *Arkhitektura, Stroitel'stvo, Transport: sb. materialov Mezhdunar. NPK / Omsk (2–3 dek. 2015 g.)* (258–263). Omsk: Sib. gos. avtomob.-dorozh. akademiya. (In Russ.).

20. Koroleva, T.I., & Zafataev, V.A. (2018). Termodinamicheskoe obosnovanie utilizatsii teploty dymovykh gazov v kondensatsionnykh teploutilizatorakh na primere kotel'noi «5-i polk» g. Vitebska. In A.A. Bakatovich (Eds.) & L.M. Parfenova (Eds.). *Arkhitekturno-stroitel'nyi kompleks: Problemy, Perspektivy, Innovatsii: elektron. sb. st. Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 50-letiyu Polotsk. gos. un-ta*. Novopolotsk: Polotsk State University (418–425). (In Russ.).
21. Koroleva, T.I., & Zafataev, V.A. (2016). Proverka usloviya kondensatsii vlagi v vozdushnom teploutilizatore rekuperativnogo tipa. *Stroitel'stvo-2016: sb. materialov II Bryanskogo mezhdunar. innov. foruma / Bryansk (1 Dek. 2016 g.)*, T. 2 (51–54). Bryansk: Bryan. gos. inzhener.-tekhnol. un-t. (In Russ.).
22. Zafataev, V.A. (2016). Opredelenie vozmozhnosti kondensatsii vlagi v vozdushnom plastinchatom utilizatore teploty rekuperativnogo tipa. *Innovatsionnye tekhnologii v promyshlennosti: obrazovanie, nauka, proizvodstvo: sbornik materialov vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii / Sterlitamak (16 dek. 2016g.)* (326–328). Sterlitamak: Ufim. gos. neftyanoi tekhn. un-t. Filial FGBOU VO UGNTU v g. Sterlitamake. (In Russ.).

Поступила 01.12.2024

## THERMOECONOMIC OPTIMIZATION NUMERICAL METHOD OF VENTILATION UNITS WITH RECUPERATIVE HEAT EXCHANGERS

**V. ZAFATAYEU, T. KARALIOVA**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*A thermoeconomic optimization method of ventilation units with recuperative heat exchangers is proposed, which allows comparing the efficiency indicators of recuperative heat exchangers with different designs of the heat exchange surface. It is noted that it is inexpedient to select a single generalized optimality criterion and derive an analytical expression for it due to the need to take into account a large amount of discretely changing factors and introduce restrictions to them.*

**Keywords:** recuperative heat exchanger, efficiency indicators, factor, thermoeconomic optimization, the determining temperature.

УДК 691.542

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-13-17

## КРИТЕРИИ ПОРОГА ПЕРКОЛЯЦИИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ В ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЯХ МИКРОСТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

*канд. техн. наук В.В. КРАВЧЕНКО*  
(Брестский государственный технический университет)  
*vvkravchenko@g.bstu.by*

*В настоящее время для оценки термодинамических и механических характеристик цементных композитов широко используют дискретные модели развития микроструктуры цементного камня в процессе гидратации в виде совокупности элементарных кубических ячеек, называемых вокселями. Одним из важных состояний цементной системы в процессе гидратации является перколяция твердой фазы, при которой образуется ее начальная жесткость. Такое состояние в теории перколяции называют порог перколяции. Порог перколяции играет важную роль в прогнозировании термодинамических и механических характеристик цементных композитов.*

*Классический способ определения порога перколяции в дискретных моделях микроструктуры цементного камня основан на использовании алгоритма прожига. Однако такой подход приводит к высокой вариативности показателя порога перколяции твердой фазы в цементных системах, что обуславливает существенные искажения прогнозируемых значений характеристик цементных композитов.*

*В данной статье рассмотрены уточненные критерии порога перколяции твердой фазы в дискретных моделях цементного камня, позволяющие снизить степень разброса показателя порога перколяции.*

**Ключевые слова:** цементный камень, порог перколяции, дискретная модель, воксел, алгоритм прожига.

**Введение.** Цементный камень характеризуется чрезвычайно сложной и неоднородной пористой структурой, формирующейся в процессе гидратации. Основой его структуры является твердая фаза, состоящая из зерен цемента, на поверхности которых образуются продукты гидратации, распределенных в объеме цементного камня случайным образом. Пространство между частицами твердой фазы принято рассматривать как поровое пространство цементного камня.

Важным состоянием гидратирующей цементной системы является момент времени, когда разрозненные частицы твердой фазы, первоначально связанные между собой силами Ван-дер-Ваальса, объединяются в единый кластер, формируя начальную жесткость системы. В теории перколяции такое состояние характеризуют порогом перколяции. Порог перколяции выражают значением (часто называемым критическим) некоторого параметра, например, концентрации определенной фазы в структуре, при которой эта структура становится либо непрерывной, либо, наоборот, дискретной [1; 2]. Теория перколяции описывает случайные структуры, поэтому этот параметр характеризует вероятность, с которой структура заполнена определенной фазой.

В строительной практике широко используют другой термин, соответствующий этому состоянию, – сроки схватывания, т.е. некоторый момент времени, когда цементное тесто теряет подвижность, и образуется твердое тело в виде цементного камня, обладающего некоторой начальной прочностью и жесткостью.

Согласно теории перколяции, термодинамические и механические характеристики цементных композитов могут быть определены в следующем виде [2]:

$$E \propto \begin{cases} 0, p < p_c \\ (p - p_c)^\gamma, p \geq p_c \end{cases} \quad (1)$$

где  $E$  – характеристика цементного композита (например, модуль упругости, прочность и др.);

$p$  – вероятность заполнения структуры цементного камня перколированной твердой фазой в произвольный момент времени;

$p_c$  – вероятность заполнения структуры цементного камня твердой фазой в момент ее перколяции (порог перколяции);

$\gamma$  – экспонента.

При моделировании свойств цементных композитов также используют модифицированную зависимость:

$$E \propto \begin{cases} 0, \alpha < \alpha_c \\ (\alpha - \alpha_c)^\gamma, \alpha \geq \alpha_c \end{cases} \quad (2)$$

где  $\alpha$  – степень гидратации цементной системы в произвольный момент времени;

$\alpha_c$  – степень гидратации цементной системы, соответствующая порогу перколяции твердой фазы.

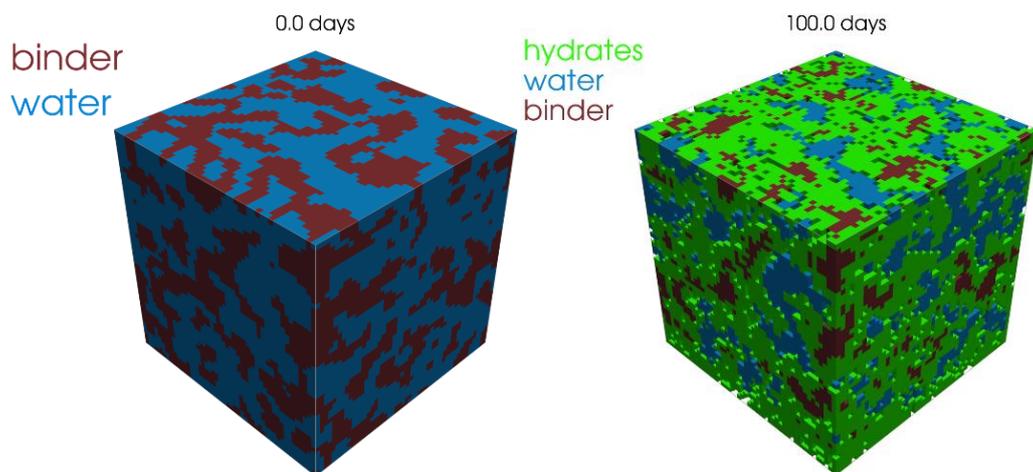
В настоящее время для оценки термодинамических и механических характеристик цементных композитов широко используют структурно-механические модели, основанные на вычислительных моделях развития микроструктуры цементного камня в процессе гидратации.

Существует два основных подхода к моделированию развития микроструктуры цементного камня – векторный [3] и дискретный [4], каждый из которых обладает преимуществами и недостатками. Наиболее предпочтительным является дискретный подход, основанный на представлении репрезентативного объема цементного камня

в виде совокупности элементарных кубических ячеек с определенной длиной ребра (обычно равной 1 мкм), называемых вокселями. В произвольный момент времени каждый воксель ассоциируют с определенной фазой цементного камня (например, воды, цемента или цементного геля). В начальный момент времени репрезентативный объем цементного камня состоит только из вокселей воды и цемента, распределенных в нем случайным образом.

Количество и пространственное расположение вокселей, ассоциированных с каждой фазой, постоянно изменяется в процессе гидратации (например, количество вокселей воды и цемента уменьшается, а продуктов гидратации соответственно увеличивается). Условия, по которым происходит изменения состояния вокселей, зависят от конкретной модели.

Одной из самых известных дискретных моделей цементного камня является SEMHYD3D [4], в которой процесс гидратации основан на теории клеточных автоматов. Существуют и более простые в вычислительном плане модели, например, [5], где процесс гидратации основан на феноменологических моделях прогнозирования степени гидратации и стехиометрии реакций гидратации (рисунок 1).



binder – цемент, water – вода, hydrates – цементный гель, полые воксели – газообразная фаза

Рисунок 1. – Эволюция микроструктуры цементного камня при В/Ц=0,5, твердеющего в изолированных условиях по дискретной модели [5] (слева – в начальный момент времени, справа – через 100 дней)

Основным преимуществом дискретного подхода является представление микроструктуры цементного камня в форме, близкой к ее реальной структуре, т.е. в виде совокупности случайно распределенных фаз произвольной геометрической формы, в отличие от векторного подхода, ограниченного сферической формой фаз. Основным недостатком дискретных моделей – высокая вычислительная сложность, связанная с обработкой большого количества вокселей, случайно распределенных в репрезентативном объеме.

Еще одним недостатком таких моделей является высокая вариативность показателя порога перколяции твердой фазы, обусловленная как особенностью структуры, в которой фазы распределены случайным образом, так и критериями его определения, что в итоге приводит к существенным искажениям прогнозируемых значений характеристик цементных композитов.

Практически все существующие дискретные модели цементного камня определяют порог перколяции, используя лишь один критерий, основанный на алгоритме прожига, что вносит достаточно весомый вклад в его высокую вариативность.

В данной статье рассмотрены уточненные критерии порога перколяции твердой фазы в дискретных моделях микроструктуры цементного камня, позволяющие снизить степень разброса показателя порога перколяции.

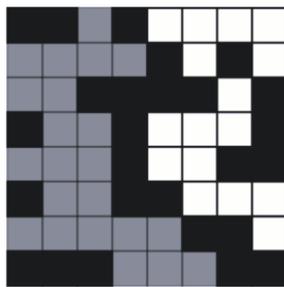
**Алгоритм прожига.** Данный алгоритм [6] (англ. *burning algorithm*) является основным для определения порога перколяции в двухфазных дискретных системах со случайной структурой<sup>1</sup> (схема алгоритма представлена на рисунке 2) и активно применяется при моделировании микроструктуры цементного камня [7–9].

Начиная с одной произвольной стороны изображения, «прожигают» (идентифицируют) все пиксели требуемой фазы, граничащие с ней. Затем в направлении противоположной стороны постепенно «прожигают» каждый пиксель данной фазы, который соприкасается (имеет общую грань) с одним из ранее «сгоревших» пикселей. Этот процесс продолжают до тех пор, пока не останется пикселей, которых можно «прожечь».

Если существует хотя бы один такой «огонь», который горит от одной стороны изображения до противоположной стороны (т.е. существует цепочка «сгоревших» пикселей, непрерывно следующих друг за другом от исходной до противоположной стороны), тогда говорят, что «сгоревшие» пиксели образуют связанный кластер фазы или о перколяции фазы.

<sup>1</sup> Алгоритм изначально разработан для анализа двумерных цифровых изображений, со случайно структурой.

Поскольку рассматриваемая система обладает случайной структурой, образуемый связанный кластер не имеет постоянной (фиксированной) формы и, соответственно, объем этого кластера каждый раз будет различным.



**Рисунок 2. – Схема алгоритма прожига для двухмерной дискретной системы (пиксели серого цвета – «сгоревшие» пиксели, образующие перколяционный кластер; белого цвета – «несгоревшие» пиксели)**

Однако следует учесть, что теория перколяции оперирует абстрактной случайной дискретной системой, в то время как микроструктурные модели описывают реальную гидратирующую цементную систему, что обуславливает два следующих закономерных вопроса.

1. Является достаточным образование всего одного кластера, связывающего две противоположные стороны, чтобы охарактеризовать цементную систему как обладающую некоторой начальной жесткостью, учитывая, что объем этого кластера может варьироваться в широких пределах. Например, возможно образование цепочки вокселей, связывающей две противоположные стороны строго по прямой, что согласно теории перколяции тоже является связанным кластером минимального объема. Может ли такой кластер описывать состояние начальной жесткости цементной системы является открытым вопросом.

2. Каково должно быть соотношение вокселей цемента и цементного геля в связанном кластере твердой фазы в момент перколяции, учитывая, что начальная жесткость цементного камня зависит от объема образуемого цементного геля. Особенно это актуально для цементных систем с низким водоцементным отношением, поскольку в таких системах начальный относительный объем цемента больше, чем воды, и как следствие в дискретной модели такой системы в начальный момент времени количество вокселей цемента больше, чем вокселей воды. Это означает, что не исключена ситуация, при которой возможно образование формально связанного кластера, состоящего только из вокселей цемента (или преобладающего их количества), что приведет к неадекватной оценке порога перколяции, поскольку, очевидно, такой кластер нельзя рассматривать как связный применительно к цементной системе.

Можно предположить, что состояние перколяции, определяемое алгоритмом прожига, более подходит для описания начала схватывания цементного теста, соответствующего моменту времени, при котором образуются первоначальные контакты между частицами твердой фазы, но сама цементная система еще не обладает начальной жесткостью.

**Критерии порога перколяции в дискретных моделях цементных систем.** Учитывая возможное расхождение в оценках порога перколяции классическим алгоритмом прожига, более предпочтительно использовать критерий в виде вероятности наступления перколяции ( $P$ ):

$$P = \frac{n}{N}, \quad (3)$$

где  $n$  – количество элементарных (единичных) состояний цементной системы, в которых наблюдается перколяция;  $N$  – общее количество анализируемых элементарных состояний цементной системы.

В качестве элементарного анализируемого состояния цементной системы следует рассматривать произвольное поперечное сечение репрезентативного объема цементного камня.

Общее количество анализируемых состояний состоит из равного количества поперечных сечений, получаемых в каждом из измерений репрезентативного объема случайным образом. Количество таких сечений в каждом из измерений ( $N_{x,y,z}$ ) изменяется в следующем диапазоне:  $1 \leq N_{x,y,z} \leq n_{vox}$ , где  $n_{vox}$  – количество вокселей, располагаемых по длине ребра репрезентативного объема. Тогда общее их количество ( $N$ ) принимают в диапазоне:  $3 \leq N \leq 3 \cdot n_{vox}$ .

Локальную перколяцию в каждом из поперечных сечений определяют алгоритмом прожига. В случае, если в анализируемом сечении существует хотя бы один связанный кластер, к нему следует применить критерий связности. Данный критерий направлен на оценку соотношения вокселей цемента и цементного геля в перколяционном кластере посредством удаления из него вокселей цементного геля. Если после удаления фазы цементного геля кластер все еще является связанным, это означает формальную перколяцию, не обеспечивающую жесткость цементной системы, следовательно, такой кластер не учитывают при вычислении вероятности наступления перколяции.

Предлагаемый подход можно рассматривать как интегральную оценку формирования связанных кластеров в репрезентативном объеме, которая по сути является некоторой усредненной характеристикой.

Предлагаемым критерием для порога перколяции является условие:

$$P \geq P_{cr}, \quad (4)$$

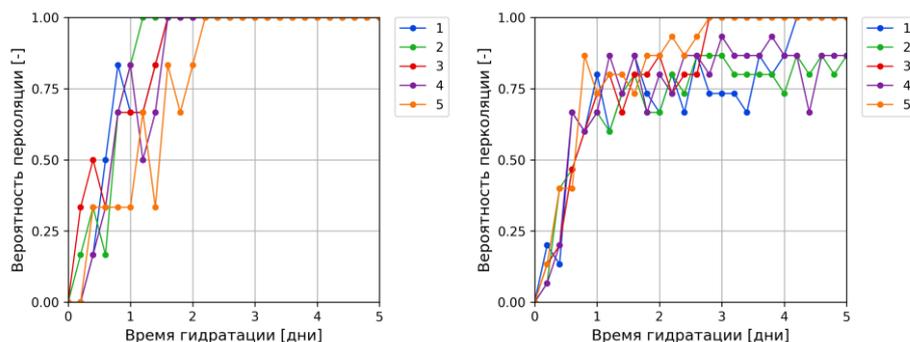
где  $P_{cr}$  – критическое значение вероятности наступления перколяции.

Критическое значение вероятности наступления перколяции зависит от количества рассматриваемых элементарных состояний цементной системы, при минимальном их количестве  $N_{min} = 3$  критическое значение принимают близкое к 1, по мере их увеличения до  $N_{max} = 3 \cdot n_{vox}$  критическое значение может быть уменьшено до 0,5.

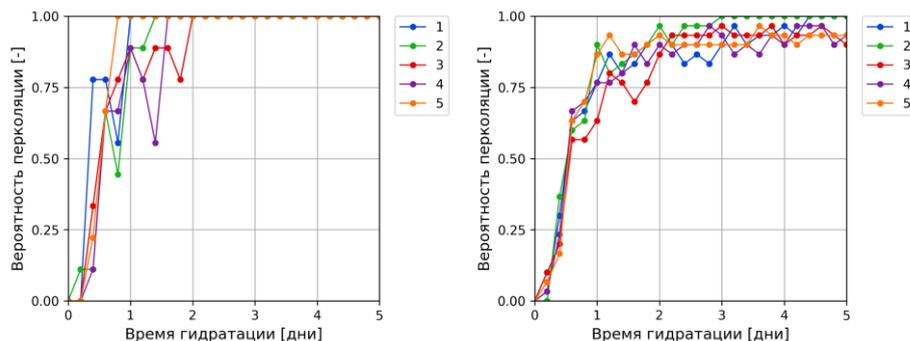
**Результаты моделирования.** Выполнено моделирование вероятности перколяции твердой фазы цементного камня на основе представленных критериев перколяции с применением дискретной модели [5].

Для моделирования использованы следующие исходные данные:

- 1) состав цементного камня: портландцемент – 370 кг/м<sup>3</sup>, вода – 185 кг/м<sup>3</sup>;
  - 2) плотность портландцемента – 3150 кг/м<sup>3</sup>, плотность воды – 1000 кг/м<sup>3</sup>;
  - 3) репрезентативный объем цементного камня в первом случае – 1000 вокселей, во втором – 8000 вокселей, что соответствует 10 и 20 вокселям, располагаемым по длине ребра репрезентативного объема;
  - 4) количество симуляций для каждого состояния репрезентативного объема цементного камня – 5.
- Результаты моделирования представлены на рисунках 3 и 4.



**Рисунок 3. – Моделирование вероятности перколяции твердой фазы в процессе гидратации для репрезентативного объема цементного камня из 1000 вокселей (слева – для 6 элементарных состояний; справа – для 15 элементарных состояний)**



**Рисунок 4. – Моделирование вероятности перколяции твердой фазы в процессе гидратации для репрезентативного объема цементного камня из 8000 вокселей (слева – для 9 элементарных состояний; справа – для 30 элементарных состояний)**

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Применение классического алгоритма прожига для определения порога перколяции твердой фазы в дискретных моделях цементного камня не позволяет достоверно оценивать момент времени, при котором цементная система обладает начальной жесткостью, приводя к искажению прогнозируемых термодинамических и механических характеристик цементных композитов.

2. Учитывая возможное расхождение в оценках порога перколяции классическим алгоритмом прожига, более предпочтительно использовать критерий вероятности наступления перколяции на основе определения перколяции в элементарных состояниях цементной системы, получаемых из репрезентативного объема. Это позволяет получить усредненную оценку порога перколяции в цементном камне.

3. Варьирование критического значения вероятности наступления порога перколяции позволяет гибко настраивать (калибровать) модель под конкретные условия процесса гидратации, обеспечивая более достоверную оценку наступления порога перколяции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Garboczi E.J., Bentz D.P. Computer Simulation and Percolation Theory Applied to Concrete // *Annual Reviews of Computational Physics*. – 1999. – Vol. VII. – P. 85–123. DOI: 10.1142/9789812813329\_0004.
2. Stauffer D., Aharony A. *Introduction to Percolation Theory*. – 2nd ed. – London: Taylor & Francis, 1992. – 192 p.
3. Van Breugel K. *Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials*. – Second edition. – Delft: Delft University Press, 1996. – 295 p.
4. Bentz D.P. CEMHYD3D: A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modeling Package. Version 3.0: NIST Interagency/Internal Report (NISTIR). – Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2005. – 277 p.
5. Kravchenko V.V. Modelling of the voxel-based microstructure of the cement paste // *Вестн. БрГТУ*. – 2024. – № 1. – С. 14–18. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-14-18.
6. Herrmann H.J., Hong D.C., Stanley H.E. Backbone and elastic backbone of percolation clusters obtained by the new method of 'burning' // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. – 1984. – Vol. 17, iss. 5. DOI: 10.1088/0305-4470/17/5/008.
7. Bentz D.P., Garboczi E.J. Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model // *Cement and Concrete Research*. – 1991. – Vol. 21, iss. 2-3. – P. 325–344. DOI: 10.1016/0008-8846(91)90014-9.
8. Torrenti J.M., Benboudjema F. Mechanical threshold of cementitious materials at early age // *Materials and Structures*. – 2005. – Vol. 38. – P. 299–304. DOI: 10.1007/BF02479294.
9. Prediction of elastic properties of cement pastes at early ages / L. Stefan, F. Benboudjema, J.M. Torrenti et al. // *Computational Materials Science*. – 2010. – Vol. 47, iss. 3. – P. 775–784. DOI: 10.1016/j.commatsci.2009.11.003.

## REFERENCES

1. Garboczi, E.J. & Bentz, D.P. (1999). Computer Simulation and Percolation Theory Applied to Concrete. *Annual Reviews of Computational Physics*, (VII), 85–123. DOI: 10.1142/9789812813329\_0004.
2. Stauffer, D. & Aharony, A. (1992). *Introduction to Percolation Theory*. London: Taylor & Francis.
3. Van Breugel, K. (1996). *Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials*. Delft: Delft University Press.
4. Bentz, D.P. (2005). *CEMHYD3D: A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modeling Package. Version 3.0: NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
5. Kravchenko, V.V. (2024). Modelling of the voxel-based microstructure of the cement paste. *Vestnik of Brest State Technical University*, (1), 14–18. (In Engl., abstr. in Russ.). DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-14-18.
6. Herrmann, H.J., Hong, D.C. & Stanley, H.E. (1984). Backbone and elastic backbone of percolation clusters obtained by the new method of 'burning'. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 17(5). DOI: 10.1088/0305-4470/17/5/008.
7. Bentz, D.P. & Garboczi, E.J. (1991). Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model. *Cement and Concrete Research*, 21(2-3), 325–344. DOI: 10.1016/0008-8846(91)90014-9.
8. Torrenti, J.M. & Benboudjema, F. (2005). Mechanical threshold of cementitious materials at early age. *Materials and Structures*, (38), 299–304. DOI: 10.1007/BF02479294.
9. Stefan, L., Benboudjema, F., Torrenti J.M. & Bissonnette B. (2010). Prediction of elastic properties of cement pastes at early ages. *Computational Materials Science*, 47(3), 775–784. DOI: 10.1016/j.commatsci.2009.11.003.

Поступила 18.11.2024

## CRITERIA FOR PERCOLATION THRESHOLD IN DISCRETE MICROSTRUCTURAL MODELS OF CEMENT PASTE

V. KRAVCHENKO  
(Brest State Technical University)

Currently discrete models of the cement paste microstructure consist of a set of elementary cubic cells called voxels are widely used to evaluate thermodynamic and mechanical characteristics of cement-based composites. One of the important states of the hydrated cement system is percolation of the solid phase at which a transition from a plastic state to a solid state occurs. In percolation theory, this point is called the percolation threshold. The percolation threshold plays an important role in predicting thermodynamic and mechanical characteristics of cement-based composites.

The classical approach for evaluating the percolation threshold in discrete models of cement paste is based on the burning algorithm. However, this approach leads to high variability of the percolation threshold in hydrated cement systems causing significant data distortion in the predicted characteristics of cement-based composites.

This article presents refined criteria for the percolation threshold of the solid phase in discrete models of cement paste, which facilitates to reduce the degree of scatter in percolation threshold values.

**Keywords:** cement paste, percolation threshold, discrete model, voxel, burning algorithm.

УДК 691.542

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-18-24

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГИ В ПОРОВОЙ СРЕДЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В РАННЕМ ВОЗРАСТЕ

канд. техн. наук **В.В. КРАВЧЕНКО**  
(Брестский государственный технический университет)  
vkravchenko@g.bstu.by

Существующие подходы к моделированию распределения свободной влаги в поровой структуре цементного камня основаны на уравнении Ричардса, основным параметром которого является коэффициент фильтрации влаги. Для его численного определения необходимы зависимости, связывающие величину капиллярного давления с количеством влаги в поровой среде. На практике для этого наиболее часто используют феноменологические уравнения ван Генухтена. Такой подход не является оптимальным, поскольку для таких феноменологических моделей необходимо экспериментальное обеспечение с целью подбора (установления) необходимых параметров.

В данной статье предложено вместо феноменологических уравнений ван Генухтена использовать условие термодинамического равновесия в поровой среде на основе распределения пор цементного камня по размерам, зависящего от единственного структурного параметра, приближительная оценка которого может быть получена из вычислительных моделей развития микроструктуры цементного камня, что позволяет не прибегать к трудоемким экспериментальным исследованиям для подбора необходимых параметров.

**Ключевые слова:** цементный камень, фильтрация влаги, диффузия водяного пара, капиллярное давление, распределение пор по размерам.

**Введение.** Цементный камень является ключевой фазой композитов на основе цемента, оказывающей существенное влияние на их физико-механические характеристики. В классическом представлении цементный камень – композит, характеризующийся чрезвычайно сложной и неоднородной пористой структурой, формирующейся в процессе гидратации.

С момента образования начальной жесткости цементного камня, в его полностью заполненных водой затвердения порах начинают возникать пространства, заполненные газообразной фазой, являющиеся следствием потребления свободной воды из поровой среды на реакции гидратации. Появление газообразной фазы в поровой среде цементного камня приводит к возникновению капиллярного давления, сопровождающегося снижением относительной влажности и являющегося одним из основных факторов, обуславливающих такой вид собственных деформаций, как усадка. В зависимости от водоцементного отношения и условий твердения проявляется либо воздушная усадка (характерная для высоких значений водоцементного отношения и условий твердения, при которых наблюдается физико-химическое взаимодействие с окружающей средой), либо аутогенная усадка (характерная для низких значений водоцементного отношения и изолированных условий твердения).

Развитие усадки в условиях ограничения, например, зерен заполнителя в свою очередь является основной причиной возникновения микротрещин в структуре цементного камня в процессе гидратации.

Моделирование распределения свободной влаги в поровой структуре цементного камня позволяет определять основные параметры термодинамического состояния в поровой среде цементного камня (например, количество влаги в определенной точке его объема, относительную влажность, значение капиллярного давления и др.), которые являются данными, необходимыми для прогнозирования основных механизмов, обуславливающих возникновение и развитие усадки в его структуре, являясь, таким образом, одной из актуальных задач в теории бетонного поведения.

В данной статье представлена модель распределения влаги в поровой среде цементного камня, основанная на уравнении Ричардса, для которого ключевые параметры определяют исходя из условия термодинамического равновесия в поровой среде, используя вероятностную модель распределения пор по размерам.

**Математическая модель.** Большинство из существующих моделей распределения влаги в поровой среде цементного камня основаны на уравнении Ричардса, описывающем фильтрацию влаги в ненасыщенных почвах. Оно может быть представлено в нескольких формах, базовая из которых имеет следующий вид [1]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q} + S = 0, \quad (1)$$

где  $\theta$  – относительное содержание влаги, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  
 $\vec{q}$  – плотность потока влаги, 1/с;  
 $S$  – сток влаги, 1/с;  
 $t$  – время, с.

Рассматривая цементный камень как изотропный материал, уравнение (1) применительно к его поровой среде можно записать в следующей одномерной форме:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial \theta_{hyd}}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

где  $D(\theta)$  – коэффициент фильтрации влаги в ненасыщенной поровой среде, м<sup>2</sup>/с;

$\frac{\partial \theta_{hyd}}{\partial t}$  – потребление влаги на реакции гидратации, (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>)/с.

Применительно к поровой среде цементного камня, механизм фильтрации влаги включает два термодинамических процесса: фильтрацию жидкости, обусловленную законом Дарси ( $D_l(\theta)$ ), и диффузию водяного пара, обусловленную первым законом Фика ( $D_v(\theta)$ ) [2].

Уравнение (2) предполагает два основных допущения:

1) перенос водяного пара регулируется чистым диффузионным процессом т.е. адвективный поток газа пренебрежимо мал по отношению к диффузионному потоку газообразной фазы, состоящей из смеси сухого воздуха и водяного пара;

2) давление газообразной фазы является постоянным в течение процесса гидратации.

Тогда, используя закон Дарси, первый закон Фика и закон Дальтона для смеси газов, коэффициент фильтрации влаги в ненасыщенной поровой среде цементного камня можно представить в виде суммы двух компонентов [2; 3]:

$$D(\theta) = D_l(\theta) + D_v(\theta) = \frac{k_{eff}}{\eta_l} \cdot \frac{\partial p_c}{\partial \theta} + \frac{D_{eff}}{p_v} \cdot \left( \frac{p_v}{\rho_l} \right)^2 \cdot \frac{\partial p_c}{\partial \theta}, \quad (3)$$

где  $\eta_l$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$p_c$  – капиллярное давление, Па;

$p_v$  – давление водяного пара, Па;

$\rho_v$  – плотность водяного пара, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_l$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$k_{eff}$  – эффективный коэффициент проницаемости, м<sup>2</sup>, который для ненасыщенной поровой среды цементного камня определяют как [2; 3]:

$$k_{eff} = k \cdot k_r(\theta); \quad (4)$$

$k$  – абсолютный коэффициент проницаемости, м<sup>2</sup>;

$k_r$  – относительный коэффициент проницаемости жидкой фазы;

$D_{eff}$  – коэффициент диффузии водяного пара, м<sup>2</sup>/с, определяемый как [2]:

$$D_{eff} = f(\theta, \phi) \cdot D_0 \cdot \frac{p_{atm}}{p_g} \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1,88}; \quad (5)$$

$f(\theta, \phi)$  – коэффициент эффективности диффузии в пористой среде цементного камня;

$\phi$  – относительный объем пористости цементного камня, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$D_0$  – коэффициент диффузии водяных паров в воздухе при температуре 273,15 К и атмосферном давлении, м<sup>2</sup>/с;

$p_{atm}$  – атмосферное давление, Па;

$p_g$  – давление газообразной фазы, Па;

$T$  – фактическая абсолютная температура, К;

$T_0$  – абсолютная температура равная 273,15 К.

Следует отметить, что в большинстве существующих моделей используется несколько иная форма уравнения (2), выраженная через степень насыщения пор влагой  $S$ , которую получают, используя соотношение  $\theta = \phi \cdot S$ .

Ключевыми параметрами представленной модели в зависимости от используемой формы являются зависимости:  $p_c(\theta)$  ( $p_c(S)$ ) и  $k_r(\theta)$  ( $k_r(S)$ ). Существующий подход к определению этих двух зависимостей основан на феноменологических моделях, предложенных ван Генухтенем [2; 4]:

$$p_c(S) = a \cdot (S^{-b} - 1)^{-\frac{1}{b}}; \quad (6)$$

$$k_r(S) = \sqrt{S} \cdot \left( 1 - \left( 1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2, \quad m = \frac{1}{b}, \quad (7)$$

где  $a, b$  – подбираемые параметры, зависящие от микроструктуры материала,  $a$  в Па;

Существенный недостаток представленных моделей – сложность в определении параметров  $a$  и  $b$ . Классический подход основан на экспериментальном построении изотерм сорбции и десорбции водяного пара для исследуемой структуры цементного камня, на основе которых путем аппроксимации подбирают оптимальные значения указанных параметров. Этот подход является трудоемким и требующим специального оборудования.

Другой подход связан с аппроксимацией параметров по уже проведенным подобным исследованиям. Однако и он имеет ограничения, связанные с малым количеством выполненных исследований, что сильно снижает достоверность подбираемых параметров. По сути, большинство существующих моделей распределения влаги в цементном камне используют данные лишь нескольких подобных исследований [3–5].

Более гибким подходом является оценка капиллярного давления и эффективного коэффициента проницаемости исходя из термодинамического равновесия пористой среды на основе вычислительной модели распределения пор по размерам, для которой единственный параметр может быть определен при моделировании развития микроструктуры цементного камня в процессе гидратации, позволяя не прибегать к трудоемким экспериментальным исследованиям.

**Термодинамическое равновесие пористой среды.** Вероятностная модель распределения пор по размерам может быть представлена упрощенным унимодальным вероятностным распределением Рэлея-Ритца [6]:

$$V(r) = 1 - e^{-B \cdot r}, \quad (8)$$

где  $V$  – относительный объем пор до радиуса  $r$ ;

$r$  – радиус пор, м;

$B$  – структурный параметр, соответствующий максимуму функции плотности вероятности распределения пор, 1/м.

Распределение пор цементного камня по размерам позволяет оценить количество воды, находящейся в поровой среде при заданной относительной влажности. Для этого нужно выразить условие термодинамического равновесия между жидкостью и водяным паром в поровой среде, при котором все поры радиусов, меньших  $r_c$ , будут полностью заполнены влагой, тогда как остальные будут обезвоженными. Принимая допущение, что миграция влаги в цементном камне происходит в основном только через капиллярные поры, условие термодинамического равновесия пористой среды записывают следующим образом [6]:

$$S(r_c) = \int_0^{r_c} \frac{dV}{dr} dr = 1 - e^{-B_c \cdot r_c}, \quad (9)$$

где  $r_c$  – радиус капиллярных пор с менисками, м;

$B_c$  – структурный параметр распределения капиллярных пор, 1/м.

Вместе с тем, условие (9) не совсем точно описывает состояние пористой среды цементного камня в процессе гидратации. Имея преимущественно капиллярное строение, пористая среда обладает классической S-образной формой изотермы сорбции-десорбции. Это обуславливает тот факт, что в процессе высыхания некоторое количество воды будет находиться в порах, с радиусами больше, чем  $r_c$  (рисунок 1).

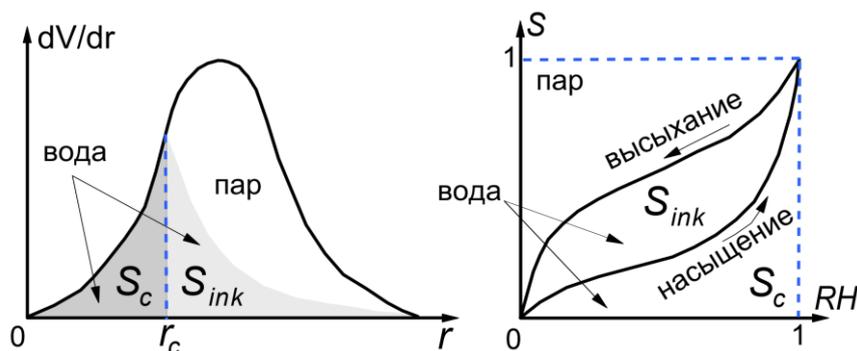


Рисунок 1. – Распределение влаги в поровой среде цементного камня в процессе гидратации, по данным [6]

Поэтому степень насыщения пор влагой является суммой двух компонентов – степени насыщения пор, соответствующей количеству воды в полностью адсорбированных влагой порах ( $S_c$ ), и степени насыщения части пор, соответствующей количеству воды в частично адсорбированных влагой порах ( $S_{ink}$ ):

$$S = S_c + S_{ink}. \quad (10)$$

Согласно [6], общую степень насыщения пор влагой можно выразить как:

$$S = S_c + S_{ink} = S_c \cdot (1 - \ln(S_c)). \quad (11)$$

На основании уравнения (9) и (11) получаем следующую зависимость для определения  $r_c$ :

$$r_c = - \frac{\ln(1 - S_c \cdot (1 - \ln(S_c)))}{B_c}, \quad (12)$$

используя которое, на основании закона Лапласа, определяют капиллярное давление:

$$p_c = -\frac{2 \cdot \gamma_w}{r_c}, \quad (13)$$

где  $\gamma_w$  – поверхностное натяжение воды, Н/м.

В предложенном подходе ключевым параметром является параметр  $B_c$ , который можно с определенной погрешностью определить, предполагая, что все капиллярные поры имеют цилиндрическую форму. В таком случае параметр фактически является функцией, зависящей от удельной площади поверхности пор и относительного объема капиллярной пористости. Существует достаточное количество моделей микроструктуры цементного камня, позволяющих оценивать удельную площадь поверхности пор в процессе гидратации, например, одна из самых простых – модель единичной ячейки [7].

**Эффективный коэффициент проницаемости.** Проницаемость в ненасыщенных пористых средах характеризуется двумя основными параметрами: абсолютной проницаемостью, соответствующей состоянию, при котором поры полностью заполнены влагой, и некоторой функции, учитывающей уменьшение количества воды в порах, через которые проходит поток миграции влаги в процессе гидратации.

Абсолютную проницаемость определяют экспериментально посредством вакуумного насыщения образца материала в воде под определенным давлением. Однако этот метод не совсем подходит для пористой структуры цементного камня, поскольку при низких значениях водоцементного отношения она становится слабопроницаемой. Еще одним способом оценки абсолютной проницаемости является общеизвестная модель проницаемости пористого тела Катца-Томпсона [8], зависящая от двух параметров: критического диаметра пор и соотношения между электропроводимостью в поровой среде и электропроводимостью поровой среды, определение которых для материалов на основе цемента является достаточно нетривиальной задачей, сильно зависящей от исследуемого состава.

Учитывая существующую сложность с определением абсолютной проницаемости, в практических целях можно использовать ранее описанный подход на основе вероятностной модели распределения пор и условия термодинамического равновесия между жидкостью и водяным паром в поровой среде, поскольку очевидно, что проницаемость пористой среды зависит от объема пор, которые полностью заполнены и связаны между собой, т.е. пор, которые лежат ниже  $r_c$  (см. рисунок 1). В работе [6] предложена следующая зависимость для определения эффективного коэффициента проницаемости исходя из условия термодинамического равновесия в поровой среде цементного камня:

$$k_{eff} = \frac{\phi_c^2}{50} \cdot \left( \int_0^{r_c} r dV \right)^2, \quad (14)$$

где  $\phi_c$  – относительный объем капиллярной пористости, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

**Перколяция твердой фазы цементного камня.** Цементное тесто после затворения водой находится до определенного момента в пластическом состоянии, в котором частицы цемента связаны между собой силами Ван-дер-Ваальса. По мере образования продуктов гидратации на поверхности частиц цемента, в некоторый момент времени происходит их объединение в единый кластер (в строительной практике имеющий термин – начало схватывания), обладающий некоторой начальной жесткостью и прочностью. Этот момент времени принято называть порогом перколяции твердой фазы.

Очевидно, можно предположить, что до момента порога перколяции твердой фазы в цементной системе два механизма диффузии влаги либо отсутствуют, либо их влияние незначительно, что в конечном итоге приводит к следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta_{hyd}}{\partial t} = 0, t < t_{per} \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial \theta_{hyd}}{\partial t} = 0, t \geq t_{per} \end{cases}, \quad (15)$$

где  $t_{per}$  – момент времени, соответствующий порогу перколяции твердой фазы.

**Вариационная формулировка.** Решение дифференциального уравнения (2) осуществляют численными методами – методом конечных разностей или методом конечных элементов. В данной работе использован метод конечных элементов, для которого вариационная постановка имеет следующий вид:

$$\int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} v dx + v D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_0^L - \int_0^L D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} dx + \int_0^L \frac{\partial \theta_{hyd}}{\partial t} v dx = 0, \quad (16)$$

где  $\theta$  – тестовая функция;

$v$  – пробная функция;

$L$  – линейный размер области решения задачи, м.

Используя неявный метод Эйлера для дискретизации по времени, вариационная формулировка (16) примет следующий вид:

$$\int_0^L \left( \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{\Delta t} \right) v dx + v D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_0^L - \int_0^L D(\theta_i) \frac{\partial \theta_i}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} dx + \int_0^L \left( \frac{(\theta_{hyd})_i - (\theta_{hyd})_{i-1}}{\Delta t} \right) v dx = 0, \quad (17)$$

где  $i$  – произвольный временной интервал;

$\Delta t$  – шаг дискретизации по времени,  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ , с.

Поскольку уравнение (17) является нелинейным относительно  $\theta_i$ , одно из возможных решений – использовать метод простой итерации для его линеаризации, когда в пределах каждого временного шага выполняют еще одну итерацию для последовательного вычисления  $\theta_i$ :

$$\int_0^L \left( \frac{\theta_{i,j}}{\Delta t} \right) v dx + v D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_0^L - \int_0^L D(\theta_{i,j-1}) \frac{\partial \theta_{i,j}}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} dV = \int_0^L \left( \frac{\theta_{i-1}}{\Delta t} \right) v dx - \int_0^L \left( \frac{(\theta_{hyd})_i - (\theta_{hyd})_{i-1}}{\Delta t} \right) v dx, \quad (18)$$

где  $j$  – произвольная итерация линеаризации.

Для нахождения решения уравнения (18) использованы следующие начальные и граничные условия для уравнения:

1) начальное условие:

$$\theta_0 = \theta_{w,0}, \quad (19)$$

где  $\theta_{w,0}$  – объемное содержание воды в цементном камне в начальный момент времени (момент затворения водой), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

2) естественное граничное условие (условие Неймана) [9]:

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} n = \theta \cdot \frac{E}{\rho_l} \cdot (p_v - p_{v,e}), \quad (20)$$

где  $n$  – единичная нормаль к границе рассматриваемой области;

$E$  – коэффициент влагопроводности, кг/(м<sup>2</sup>·с·Па);

$p_v$  – давление водяного пара на поверхности рассматриваемой области, Па;

$p_{v,e}$  – давление водяного пара в окружающей среде, Па.

**Результаты моделирования.** Для сравнительной оценки предлагаемого подхода к распределению влаги в поровой среде цементного камня исходя из условия термодинамического равновесия, проведено его численное моделирование совместно с существующим подходом на основе моделей ван Генухтена.

Для моделирования использованы следующие исходные данные:

- 1) состав цементного камня: портландцемент – 370 кг/м<sup>3</sup>, вода – 185 кг/м<sup>3</sup>;
- 2) абсолютная температура окружающей среды ( $T$ ): 293,15 К (20 °С);
- 3) плотность портландцемента: 3150 кг/м<sup>3</sup>;
- 4) атмосферное давление ( $p_{atm}$ ): 101325 Па;
- 5) коэффициент диффузии водяных паров в воздухе ( $D_0$ ) при температуре 273,15 К и атмосферном давлении:  $2,17 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с [2];
- 6) коэффициент эффективности диффузии ( $f(\theta, \phi)$ ): 0,01;
- 7) параметры  $a$  и  $b$  в модели ван Генухтена: 18,6237 МПа и 2,2748 МПа соответственно [2];
- 8) абсолютный коэффициент проницаемости ( $k$ ):  $3 \cdot 10^{-21}$  м<sup>2</sup> [2];
- 9) коэффициент влагопроводности ( $E$ ):  $2,582 \cdot 10^{-8}$  кг/(м<sup>2</sup> с Па) [9];
- 10) плотность воды ( $\rho_l$ ): 1000 кг/м<sup>3</sup>;
- 11) плотность водяного пара ( $\rho_v$ ): 0,0173 кг/м<sup>3</sup>;
- 12) динамическая вязкость воды ( $\eta_l$ ):  $1 \cdot 10^{-3}$  Па·с;
- 13) поверхностное натяжение воды ( $\gamma_w$ ): 0,073 Н/м;
- 14) относительная влажность воздуха в окружающей среде: 50%;
- 15) анализируемый период времени: 10 сут.
- 16) размер области решения: 0,1 м.

Объемное содержание воды в цементном камне в начальный момент времени ( $\theta_{w,0}$ ), относительный объем капиллярной пористости ( $\phi_c$ ), относительный объем воды, расходуемый на реакции гидратации ( $\theta_{hyd}$ ) и структурный параметр распределения капиллярных пор ( $B_c$ ) определены из модели микроструктуры цементного камня [7].

Результаты моделирования представлены на рисунках 2 и 3.

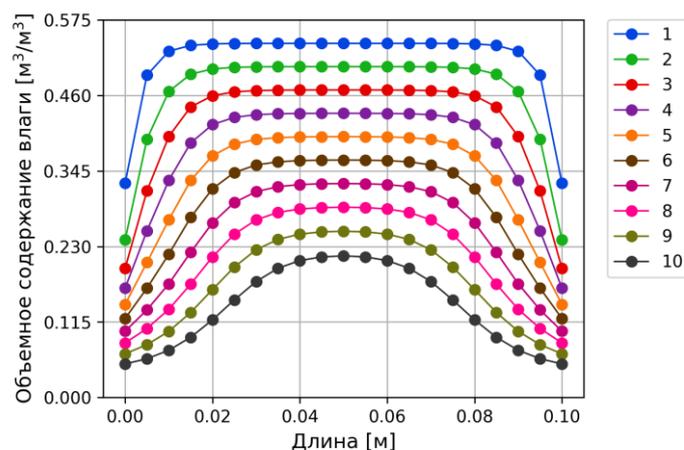


Рисунок 2. – Распределение влаги в поровой среде цементного камня на основе моделей ван Генухтена

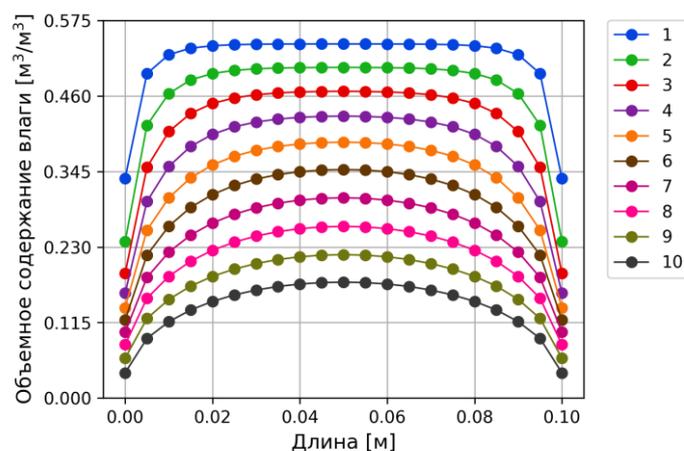


Рисунок 3. – Распределение влаги в поровой среде цементного камня исходя из условия термодинамического равновесия

**Заключение.** В основе существующих моделей для моделирования распределения влаги в поровой среде цементного камня лежит уравнение Ричардса, для которого ключевым параметром является коэффициент фильтрации влаги в ненасыщенной поровой среде. Применительно к поровой среде цементного камня, он складывается из двух компонентов: фильтрации влаги (закон Дарси) и диффузии водяного пара (первый закон Фика). Основная трудность в определении коэффициента фильтрации влаги – необходимость аппроксимации зависимостей «капиллярное давление – степень насыщения пор влагой» и «относительный коэффициент проницаемости жидкой фазы – степень насыщения пор влагой». В большинстве случаев для этого адаптируют математические модели, предложенные ван Генухтеном, для которых, в свою очередь, необходимо осуществлять подбор параметров, соответствующих анализируемой поровой структуре цементного камня, на основе экспериментальных данных, что в конечном итоге приводит к необходимости проведения трудоемких экспериментальных исследований для каждого такого анализируемого состояния.

Предлагаемый подход, описанный в статье, является более гибким, не требующим трудоемких экспериментальных исследований, поскольку основан на условии термодинамического равновесия в поровой среде цементного камня и вероятностной модели распределения пор по размерам, для которой необходим только один структурный параметр распределения капиллярных пор, приближенную оценку которого возможно получить из существующих моделей развития микроструктуры цементного камня в процессе гидратации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Celia M.A., Bouloutas E.T., Zarba R.L. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation // *Water Resources Research*. – 1990. – Vol. 26, iss. 7. – P. 1483–1496. DOI: 10.1029/WR026i007p01483.
2. Mainguy M., Coussy O., Baroghel-Bouny V. Role of Air Pressure in Drying of Weakly Permeable Materials // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2001. – Vol. 127, iss. 6. – P. 582–592. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:6(582).
3. Baroghel-Bouny V. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part II: Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction // *Cement and Concrete Research*. – 2007. – Vol. 37, iss. 3. – P. 438–454. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.11.017.

4. Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials / V. Baroghel-Bouny, M. Mainguy, T. Lassabatere et al. // *Cement and Concrete Research*. – 1999. – Vol. 29, iss. 8. – P. 1225–1238. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00102-7.
5. Baroghel-Bouny V. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials: Part I: Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure // *Cement and Concrete Research*. – 2007. – Vol. 37, iss. 3. – P. 414–473. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.11.019.
6. Maekawa K., Ishida T., Kishi T. *Multi-scale Modelling of Structural Concrete*. – New York: Taylor & Francis Group, 2009. – 655 p.
7. Кравченко В.В. Моделирование микроструктуры цементного камня на основе модели элементарной ячейки // *Вестн. БрГТУ*. – 2023. – № 3. – С. 48–53. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-48-53.
8. El-Dieb A.S., Hooton R.D. Evaluation of the Katz-Thompson model for estimating the water permeability of cement-based materials from mercury intrusion porosimetry data // *Cement and Concrete Research*. – 1994. – Vol. 24, iss. 3. – P. 443–455. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90131-7.
9. Investigation of moisture transport properties of cementitious materials / Z. Zhang, M. Thiery, I. Bayane et al. // *Cement and Concrete Research*. – 2016. – Vol. 89. – P. 257–268. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.08.013.

## REFERENCES

1. Celia, M.A., Bouloutas, E.T. & Zarba, R.L. (1990). A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resources Research*, 26(7), 1483–1496. DOI: 10.1029/WR026i007p01483.
2. Mainguy, M., Coussy, O. & Baroghel-Bouny, V. (2001). Role of Air Pressure in Drying of Weakly Permeable Materials. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(6), 582–592. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:6(582).
3. Baroghel-Bouny, V. (2007). Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part II: Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction. *Cement and Concrete Research*, 37(3), 438–454. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.11.017.
4. Baroghel-Bouny, V., Mainguy, M., Lassabatere, T. & Coussy, O. (1999). Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1225–1238. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00102-7.
5. Baroghel-Bouny, V. (2007). Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials: Part I: Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure. *Cement and Concrete Research*, 37(3), 414–473. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.11.019.
6. Maekawa, K., Ishida, T. & Kishi, T. (2009). *Multi-scale Modelling of Structural Concrete*. New York: Taylor & Francis Group.
7. Kravchenko, V.V. (2023). Microstructure development of the cement paste based on the unit cell model. *Vestn. BSTU*, (3), 48–53. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-48-53.
8. El-Dieb, A.S. & Hooton, R.D. (1994). Evaluation of the Katz-Thompson model for estimating the water permeability of cement-based materials from mercury intrusion porosimetry data. *Cement and Concrete Research*, 24(3), 443–455. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90131-7.
9. Zhang, Z., Thiery, M., Bayane, I. & Baroghel-Bouny, V. (2016). Investigation of moisture transport properties of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, (89), 257–268. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.08.013.

Поступила 11.11.2024

## MODELING OF MOISTURE TRANSPORT IN EARLY-AGE CEMENT PASTE

V. KRAVCHENKO

(Brest State Technical University)

*The existing approaches to modeling the moisture transport in early-age cement paste are based on the Richards equation, the key parameter of which is the moisture diffusion coefficient. To compute it, it is necessary to find expressions that link capillary pressure with the moisture content in the pore medium. For these purposes, the phenomenological models of van Genuchten are most often taken. The approach like that is not efficient, since such phenomenological models call for experimental data for fitting the necessary parameters.*

*In this article, instead of the phenomenological models of Van Genuchten, it is proposed to use the thermodynamic equilibrium conditions in the pore medium based on the size pore distribution of cement paste, constituting it from a single structural parameter, an approximate estimate that can be received from existing computational models of the microstructure development of cement paste, which makes it possible not to carry out experimental researches for fitting the necessary parameters.*

**Keywords:** cement paste, water transport, water vapor diffusion, capillary pressure, pore size distribution.

УДК 37.018+2

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-25-32

**РЕНОВАЦИЯ ДЕТСКИХ САДОВ ПОСТРОЙКИ 60–90-Х ГОДОВ  
ПРОШЛОГО СТОЛЕТИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**

*канд. техн. наук, доц. О.В. ЛАЗАРЕНКО, М.Л. КРУГЛИКОВА*  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*В статье рассмотрена сложившаяся ситуация с детскими садами в Беларуси, построенными в XX веке. Выявлено, что большинство детских садов в настоящее время не эксплуатируются или реконструированы под объекты другого назначения. Рассмотрена возможность реновации детского сада в социально значимый объект – православный образовательный центр на примере детского сада в г. Новополоцке. Определены направления реновации, учитывающие потребности центра, традиционные требования православной церкви и современные представления о комфорте, функциональности и эстетике для посетителей всех возрастных групп. Определены мероприятия по реконструкции; разработаны зонирование этажей здания в соответствии с перечнем необходимых помещений и их функциональным назначением, цветовые решения, отделка фасадов.*

**Ключевые слова:** детский сад, реновация, образовательный православный центр, направления реновации.

**Введение.** Дошкольное образование детей в Республике Беларусь всегда являлось важным звеном в системе образования, дающим возможность организации обучения и воспитания детей, полноценного участия родителей в жизни страны. Дошкольные учреждения строились и строятся повсеместно во всех городах и поселках республики. Начиная с 2000-х годов, в связи с изменением социальной структуры общества изменилась и востребованность детских садов: произошло ее повышение в новых микрорайонах и снижение в давно сложившихся центральных районах, таким образом, здания детских садов, построенные по типовым проектам в 60–90-х годов прошлого столетия, оказались не востребованными. По истечении времени большинство из них разрушаются, становятся местом обитания бомжей и подростков. Например, только в Минске около 15 зданий бывших детских учреждений законсервированы и не эксплуатируются (рисунок 1).



а



б

а – детский сад, ул. Калинина, 26, г. Минск; б – детский сад, пр. Любимова, 14, г. Минск

Рисунок 1. – Детские сады, построенные в 60–90-х годов прошлого столетия (начало)



в

в – детский сад, г. Гродно

Рисунок 1. – Детские сады, построенные в 60–90-х годов прошлого столетия (окончание)

В сложившейся ситуации городская и районная администрации городов и поселков пытаются решать вопрос о пустующих зданиях детских садов. Их выставляют на продажу на площадке Белорусской универсальной товарной биржи, увеличивают налог на землю под неиспользуемыми объектами. При этом новые владельцы перепродают здания, не желая что-то делать со своим приобретением. В итоге часть зданий продолжают пустовать и разрушаться, а часть реконструируются с реализацией новых функций: детские развивающие центры (рисунок 2, а); административные здания (рисунок 2, б); отделы различных ведомств и агентства (рисунок 2, в, г); факультеты высших и средних специальных учреждений образования; отделы музеев; учебные центры с общежитиями; жилые помещения; административно-торговые центры; магазины; рестораны.



а

б



в

г

а – центр коррекционно-развивающего обучения и реабилитации детей и подростков, ул. Воронянского, г. Минск; б – административное здание, ул. Славинского, г. Минск; в – центр охраны труда «Минскстроя», ул. Рокоссовского, г. Минск; г – агентство «Минск-Новости», ул. Калининградская, г. Минск

Рисунок 2. – Примеры реконструкции детских садов

Многие проекты реконструкции детских садов вызывают возмущение и недоумение у граждан, не желающих видеть в жилой зоне своего района офисы с рядами машин на парковках. В этой связи следует обратить внимание властей на то, что в Республике Беларусь важное место отводится духовно-нравственному воспитанию населения и прежде всего молодежи – объединению основных направлений деятельности государства и православной церкви: образовательной, исторической, культурной. В Государственной программе «Образование и молодежная политика» и подпрограмме «Молодежная политика» Республики Беларусь на 2021–2025 годы отмечено, что базовыми организациями для реализации направлений должны стать комплексы, в которых светский общественный и церковно-приходской центры объединены в единый объект со следующими основными направлениями деятельности: молитвенная, миссионерская, духовная и культурно-просветительская, патриотическая, духовно-нравственное воспитание; взаимодействие в социальной и психологической работе<sup>1</sup>. Таким образом, вопрос о реновации бывших детских садов в православные образовательные центры является актуальным.

**Основная часть.** На сегодняшний день православные образовательные центры в республике открыты при храмах, монастырях, приходах Минской, Могилевской, Гомельском епархии; институте теологии БГУ; домах милосердия и православной книги; средней школе «Ихвис» г. Минск. Единственный детский сад, реновация которого предполагает возможность осуществления благотворительной деятельности социальной направленности, расположен по ул. Василька, 5, г. Гродно (см. рисунок 1, в). Здание безвозмездно передано Гродненской епархии в 2021 году. В здании разместится «Гродненское благотворительное общество» с часовней, молельным залом, хостелом, административным блоком. Других аналогов в Республике Беларусь нет.

Рассмотрим возможность реновации здания бывшего детского сада № 6 по ул. Молодежная, 50, г. Новополоцк, построенного в 1963 году, под православный образовательный центр. Здание безвозмездно передано Полоцкой епархии в 2023 году.

Функциональное назначение центра: объединение и духовная поддержка прихожан и посетителей в месте совместной молитвы; реализация программы сотрудничества Министерства образования Республики Беларусь и белорусской Православной Церкви на 2020–2025 годы, соглашения о сотрудничестве между Республикой Беларусь и Белорусской православной церковью в Витебской области на 2021–2025 годы: взаимодействие с учебными заведениями Полоцка и Новополоцка – организация проведения открытых лекций, конференций, круглых столов; создание фондов богословской литературы, православных икон и церковной утвари. Расчетное количество посетителей центра составляет 90 человек, количество персонала – 15 человек, обслуживающего персонала – 5 человек.

Выбор направлений реновации здания бывшего детского сада основывается на исследовании здания: территориальное расположение; конструктивное решение; обследование состояния элементов; соответствие помещений и архитектурно-художественного решения фасада функциональному назначению центра.

Здание расположено в центральной части г. Новополоцка, в квартале с многоэтажными жилыми домами, ориентировано главным входом на запад, второстепенными выходами на восток, площадь зарегистрированного земельного участка 0,44 га (рисунок 3).



*a*

*a* – лицевой фасад здания

Рисунок 3. – Бывший детский сад № 6 (г. Новополоцк, ул. Молодежная, 50) (начало)

<sup>1</sup> URL: <https://adu.by/images/2021/02/gos-pr-obrazovanie-molod-politika-2021-2025.pdf>.



б



в

б – торцевой фасад здания; в – дворовой фасад здания

Рисунок 3. – Бывший детский сад № 6 (г. Новополоцк, ул. Молодежная, 50) (окончание)

Конструктивное решение здания детского сада следующее. Фундамент ленточный шириной 500 мм из кирпича керамического. Смешанная конструктивная схема с кирпичными несущими наружными и внутренними стенами. Балки сборные железобетонные с опиранием на столбы. Перекрытие и покрытие выполнено из сборных пустотных железобетонных плит с опиранием на несущие стены и балки, уложенные на кирпичные столбы. Несущие элементы лестниц – стальные двутавры; перегородки из кирпича керамического. Крыша – плоская, совмещенная с наружным водостоком, верхний слой – кровля из битумного рубероида.

Техническое состояние элементов здания: сопротивление теплопередаче наружных стен и цоколя – 0,729 м<sup>2</sup>С/Вт, не соответствует требованиям по сопротивлению теплопередаче; плиты перекрытия сборные железобетонные, IV категория (состояние неудовлетворительное); состояние кровельного покрытия по всей площади крыши – IV категория (неудовлетворительное); сопротивление теплопередаче конструкции совмещенного покрытия – 0,115 м<sup>2</sup>С/Вт, не соответствует требованиям по сопротивлению теплопередаче; деревянное заполнение дверных проемов – IV категория (состояние ограниченно-работоспособное и неудовлетворительное).

Здание бывшего детского сада состоит из 2 этажей с двумя одноэтажными пристройками на углах. Основные помещения на 1 этаже: спальные, групповые, игральные комнаты, раздевалки, медицинская комната, кабинеты администрации, технического персонала, кухня, кладовая, санузлы; на 2 этаже: спальные, групповые, игральные комнаты, раздевалки, зал для музыкальных занятий.

Отделка фасада здания типовая для детских садов своего времени: частично окрашенные поверхности стен из силикатного кирпича.

На основании результатов анализа объекта сформулированы *направления его реновации*.

1. Определение необходимости расширения земельного участка. Территориальное расположение и площадь позволяют создать комфортную и функциональную инфраструктуру для обучения и развития посетителей любого возраста: организовать транспортное обслуживание объекта от существующих проезжих дорог микрорайона; устройство пешеходной связи объекта с существующей инфраструктурой микрорайона с учетом безбарьерной среды; строительство автостоянки; устройство детской площадки. Расширение земельного участка не требуется. Расположение здания на участке удовлетворяет требованиям по инсоляции и естественному проветриванию.

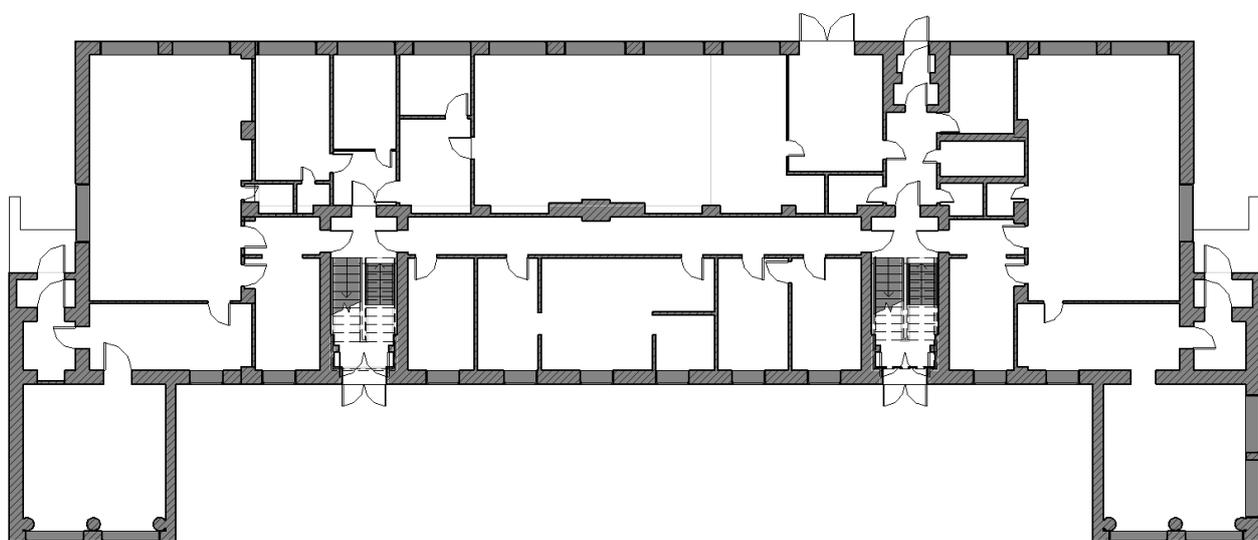
2. Выполнение мероприятий, связанных с техническим состоянием элементов здания:

- 2.1. Выполнить тепловую реабилитацию фасадов.
- 2.2. Выполнить демонтаж плит перекрытия в осях 4-8/Г-Е, демонтаж перегородок и возвести новые.
- 2.3. Выполнить замену кровли.
- 2.4. Демонтировать крыльцо, выполнить новое из гранитных плит.
- 2.5. Демонтировать оконные блоки проемов наружных стен с заменой на 2-х камерные стеклопакеты.
- 2.6. Демонтировать дверные блоки с заменой на дверные блоки деревянные.
- 2.7. Демонтировать покрытия пола и уложить новые.

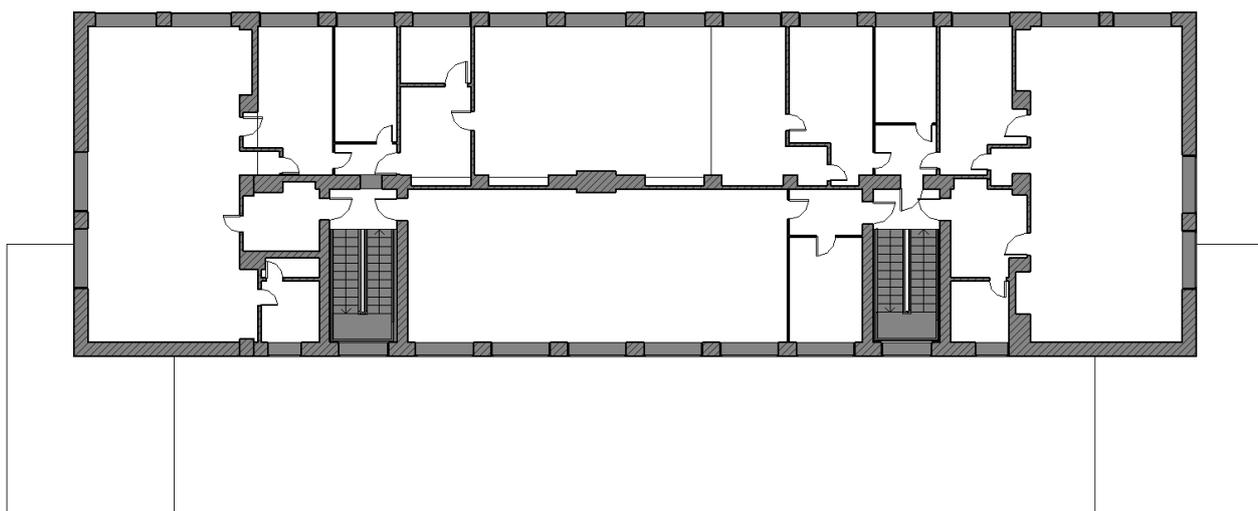
3. Дефицита площадей для изменения функционального назначения здания нет, возможна реновация объекта в существующем объеме здания без изменения его габаритов.

4. Изменение основных функционально-планировочных элементов здания и улучшение взаимосвязей между ними, изменение состава помещений и их функций для удовлетворения потребности православного образовательного центра на основании<sup>2,3</sup> (рисунок 4).

5. Изменение отделки фасада в соответствии с функциональным назначением центра.



*a*



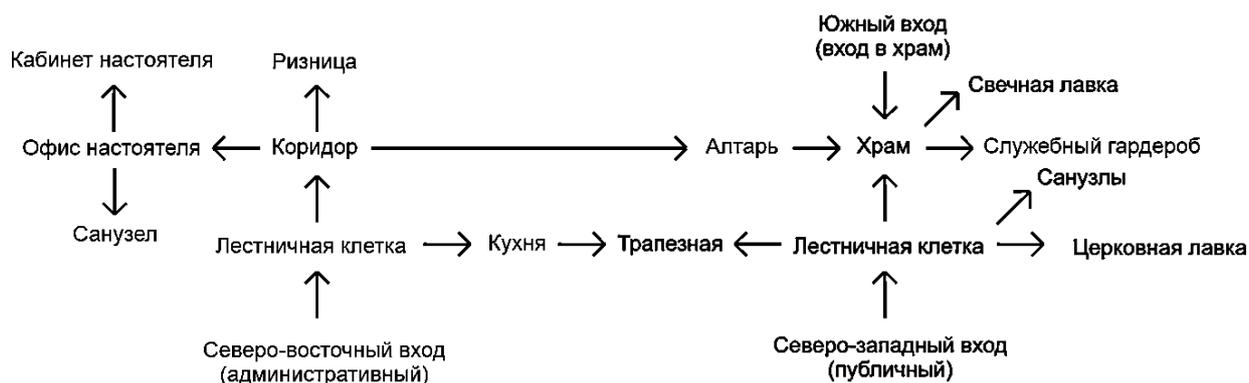
*б*

*a* – план первого этажа до реновации; *б* – план второго этажа до реновации

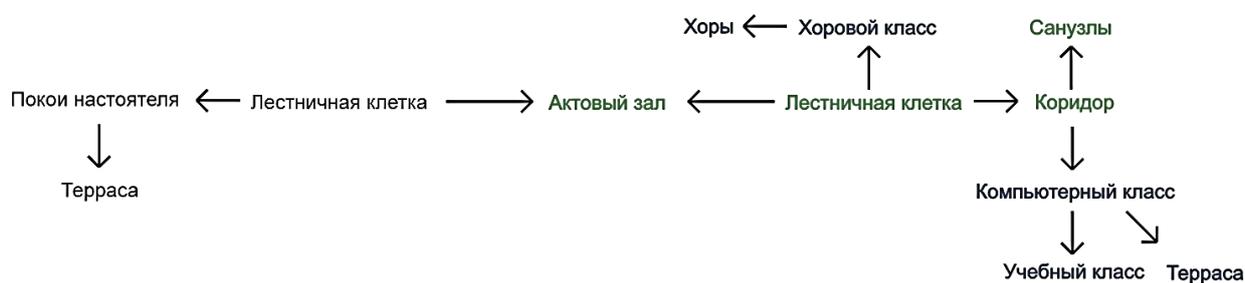
**Рисунок 4. – Изменение состава помещений и их функций (начало)**

<sup>2</sup> СП 31-103-99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов. – М.: Госстрой России, 2000. – 33 с.

<sup>3</sup> СН 3.02.02-2019. Общественные здания. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 59 с.



в



z

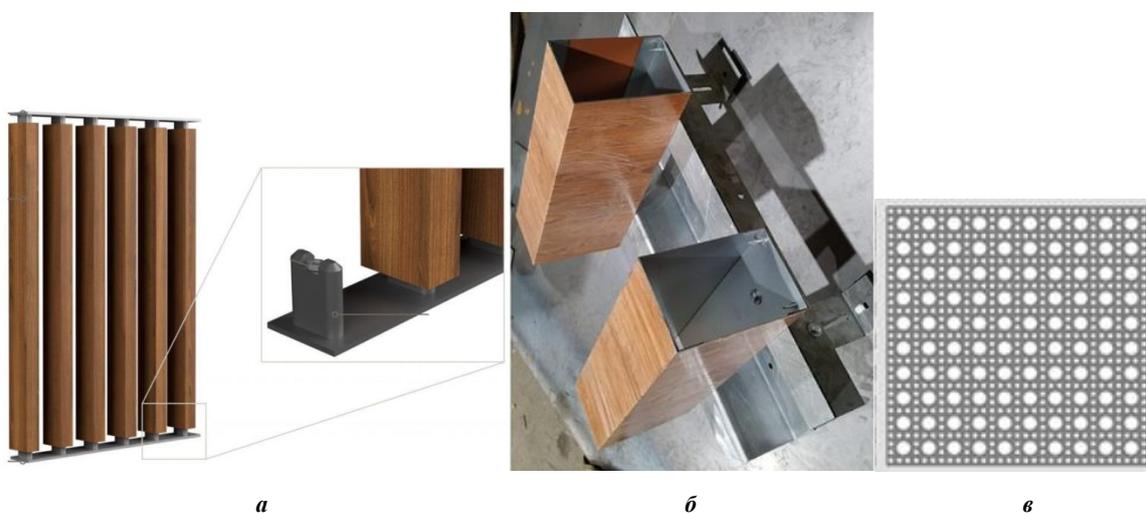
в – функциональная схема первого этажа; z – функциональная схема второго этажа

Рисунок 4. – Изменение состава помещений и их функций (окончание)

Предложено 2 варианта отделки фасадов.

1. Устройство дополнительного главного фасада на расстоянии 6 м от основного. В образовавшемся пространстве можно расположить летнее кафе. Принято выполнить устройство дополнительного главного фасада, отделку боковых фасадов, второго фасада стальными прямоугольными ламелями с полимерным покрытием (рисунок 5, а, б).

2. Устройство по всем фасадам вентилируемой системы с утеплителем и облицовкой декоративными перфорированными стальными кассетами, с шагом перфорации 9 мм. Наличие перфорации создает возможность подсветки фасада в темное время суток, серебристого цвета с круглым сечением перфорации диаметром 20 мм (рисунок 5, в).



а – крепление стальных прямоугольных ламелей на дополнительном фасаде; б – крепление стальных прямоугольных ламелей на остальных фасадах; в – декоративная перфорированная стальная кассета

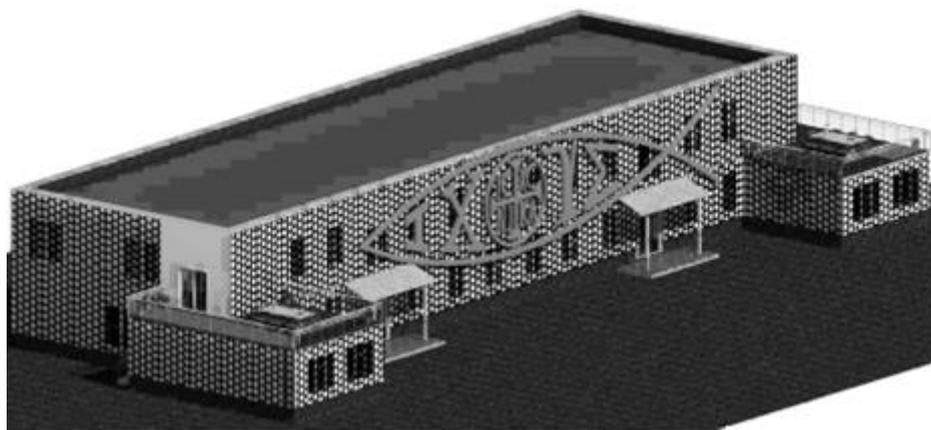
Рисунок 5. – Элементы отделки фасадов

Любой из вариантов отделки обеспечивает долговечность фасадов, возможность устройства светодиодных подсветок в темное время суток, сочетает современные архитектурные тенденции с элементами исторического контекста.

Предложено подчеркнуть принадлежность здания к светскому общественному центру и церковно-приходскому комплексу размещением на дополнительном фасаде Ихтис символа христианства в виде рыбы. В христианском учении рыба ассоциируется с жизнью, спасением, идеей объединения разных людей в единую веру в Иисуса Христа. Для выполнения дуг Ихтис символа предложены стальные трубы диаметром 150 мм с анодированным покрытием.



*а*



*б*

*а* – дополнительный главный фасад с отделкой из прямоугольных ламелей;  
*б* – отделка фасадов перфорированными панелями

**Рисунок 6. – Варианты фасадов**

6. Принятие дизайн-концепции православного образовательного центра – «Ихтис в белом», направленную на создание гармоничного сочетания духовности и современности, традиций и инноваций; требующую учета канонических уставов православной церкви и современных представлений о комфорте, функциональности и эстетике. Концепция «Ихтис в белом» – это отражение глубинного смысла православной веры.

В интерьерах должен доминировать белый цвет, символизирующий божественное сияние, духовное просветление, чистоту и невинность. Он будет фоном, на котором будут выделяться символы веры, предметы церковного искусства, элементы декора, привлекающие внимание, вызывающие интерес посетителей.

Наряду с белым цветом в дизайне интерьеров должны присутствовать темные цвета, символизирующие испытания, трудности, страдания, которые встречаются на пути каждого человека, помогающие понять, что в самые темные времена вера и стремление к добру – это путь к преодолению всех преград и обретению духовной гармонии.

В пространстве храма должны присутствовать классические элементы декора: карнизы, молдинги и современные бра и паникадило.

**Заключение.** Большое количество детских садов, построенных по типовым проектам 60–90-х годов прошлого столетия, в настоящее время не эксплуатируются. Часть из них законсервированы либо перепрофилированы под здания различного назначения. В тоже время под влиянием социальных процессов в современном обществе возникает значимость объектов светско-религиозной направленности, предназначенных для духовно-нравственного развития посетителей любого возраста.

В ходе проведенного исследования выявлены особенности и потенциал детского сада в г. Новополоцке, построенного в 1963 году, для размещения православного образовательного центра с высокой социальной значимостью.

Определены направления реновации здания, предложены рекомендации по реконструкции и дизайну здания с гармоничным пространством, способствующим духовно-нравственному развитию посетителей всех возрастных групп и создающим благоприятную атмосферу для обучения, общения и проведения мероприятий.

Предложенные рекомендации могут быть реализованы в проектной практике.

*Поступила 08.12.2024*

## RENOVATION OF KINDERGARTENS BUILT IN THE 1960S-90S IN THE REPUBLIC OF BELARUS

**V. LAZARENKA, M. KRUHLIKAVA**  
*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*The article considers the current situation with kindergartens in Belarus built in the XX century. It is revealed that the majority of kindergartens are currently not operated or reconstructed for other purposes. The possibility of kindergarten renovation into a socially significant object – an orthodox educational centre is considered on the example of a kindergarten in Novopolotsk. The directions of renovation were determined, taking into account the needs of the centre, traditional requirements of the Orthodox Church and modern ideas about comfort, functionality and aesthetics for visitors of all age groups. The renovation activities were defined; zoning of the building floors in accordance with the list of required premises and their functional purpose, colour solutions, facade finishes were developed.*

**Keywords:** *kindergarten, renovation, educational orthodox centre, directions of renovation.*

УДК 624.159.1

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-33-39

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО БАРЬЕРА В ВИДЕ ОТКРЫТОЙ ТРАНШЕИ С КРЕПЛЕНИЕМ СТЕНОК ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ГРУНТОВОЙ СРЕДЕ

канд. техн. наук, доц. **К.Э. ПОВКОЛАС, О.А. ШАВЛОВСКАЯ**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматривается эффективность использования открытой траншеи без заполнения шириной 1 м с креплением ее стенок для демпфирования колебаний, распространяющихся в грунтовой среде, от точечного источника вибродинамических воздействий. Сформирована математическая модель на основе метода конечных элементов. Для равных физико-механических свойств грунта смоделировано 3 расчетных схемы: в виде свободного распространения колебаний в грунтовой среде без препятствий, в виде открытой траншеи с креплением ее стенок 2-мя заземленными подпорными плитными стенками и с дополнительным креплением в виде наклонных анкерных свай для большей глубины траншеи. По результатам расчетов выявлено, что устройство открытой траншеи на пути распространения волн с креплением ее стенок обеспечивает снижение величин вертикальных амплитуд колебаний поверхности грунта за ней на расстояние, равное двум длинам поверхностной волны. Наибольшее снижение амплитуд колебаний отмечается непосредственно за открытой траншеей на расстоянии, равном 15–30% от длины поверхностной волны. Оно достигает 43% для варианта крепления стенок траншеи вертикальными заземленными подпорными конструкциями и 73% для варианта крепления стенок открытой траншеи большей глубины дополнительными наклонными анкерными сваями.

**Ключевые слова:** вибродинамические воздействия, грунтовая среда, барьер, траншея, виброизоляция, расчет, конечные элементы.

**Введение.** Наличие развитой транспортной сети и промышленных зон в городах приводит к появлению вблизи них вибрационных полей за счет волн, распространяющихся в грунтовой среде. Вносит значительный вклад и производство строительных работ (забивка и вибропогружение свай и шпунта, виброуплотнение грунтов) в условиях стесненной городской застройки. Колебания оказывают негативное влияние на людей, высокоточное оборудование и конструкции строений, ускоряя их физический износ и вызывая образование дефектов и повреждений. Они распространяются в грунтовой среде в виде продольных, поперечных и поверхностных (Рэлеевских) волн, последние из которых оказывают наибольшее влияние на здания и сооружения. Достигая грунтовых оснований фундаментов строений, они вызывают их дополнительные неравномерные динамические осадки за счет виброуплотнения и виброползучести грунта, которые приводят к появлению дополнительных напряжений в наземных конструкциях и, как следствие, к образованию трещин.

Для оценки вероятного повреждения строений при прохождении поверхностных волн в настоящее время в основном используют эмпирический подход, суть которого заключается в сравнении пиковой величины скорости колебаний с предельной величиной, которая отличается в нормах различных стран и зависит от частоты вынужденных колебаний, инженерно-геологических условий, конструктивной схемы строений и наличия повреждений. В Германии, Норвегии и Великобритании нормируется скорость вертикальных колебаний фундамента строения, в Беларуси и США – скорость колебания грунта перед фундаментом. Кроме этого, автором предложен новый подход [1] в оценке повреждения конструкций, который заключается в определении суммарных (динамических и статических) неравномерных осадок фундаментов и сравнении их с предельными величинами по технико-нормативным правовым актам, или расчете строительных конструкций на основании силовых факторов, полученных в ходе прямого статического и динамического анализа конструкций. В данной методике расчета величина максимального ускорения колебаний грунта под подошвой фундамента сравнивается с критическим ускорением колебаний, при котором начинают развиваться сдвиговые и объемные деформации грунта. При этом предполагается, что уплотнение грунта под подошвой фундамента происходит до его предельно плотного состояния. Получить величину критического ускорения колебаний можно путем испытаний в виброкомпрессионном приборе. Для ориентировочного назначения этой величины можно воспользоваться данными приложения Д<sup>1</sup>.

Для снижения этих воздействий используют виброизоляцию источника, приемника колебаний или преобразование грунтовой среды между ними. В случае невозможности виброизоляции источника или приемника колебаний используют устройство барьеров между ними в грунтовой среде.

Одним из направлений виброизоляции является устройство вертикального барьера на пути распространения поверхностных волн в виде траншеи, открытой или заполненной материалами, имеющими физико-механические свойства, отличные от грунтовой среды. В качестве материала заполнения траншей наиболее часто используют геоплену EPS [2; 3], резе – древесные опилки и резиновую крошку [4], газонаполненные баллоны под давлением [5] и бетон [6]. Наиболее эффективным считается устройство открытых траншей без заполнения. Исследования их эффективности проводились экспериментально на натурных моделях в середине 60-х годов прошлого века [7]

<sup>1</sup> ТКП 45-5.01-264-2012. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Фундаменты при вибродинамических воздействиях. Правила проектирования. – Минск: Стройтехном, 2012. – 114 с.

и в настоящее время продолжают уже теоретически, на основании численного моделирования [8]. На практике открытые траншеи во многих случаях не применимы в течение длительного времени из-за проблем с обеспечением устойчивости их стенок. Кроме того, эффективность экранирования снижается при высоком уровне грунтовых вод, когда траншея частично затоплена и отсутствует возможность водопонижения. Временное использование открытых траншей вполне приемлемо при производстве строительных работ по забивке свай, вибропогружению и виброизвлечению стального шпунта, виброотрамбовке и ударному уплотнению грунта.

Устойчивость стенок траншеи определяется величинами удельного сцепления, угла внутреннего трения и удельного веса грунта. Определяющей величиной является удельное сцепление. Глубина траншеи  $h$ , при отсутствии пригрузки на прилегающей поверхности грунта, при которой обеспечивается устойчивость стенок скважины, определяется по следующей формуле механики грунтов, исходя из предположения о потере устойчивости грунта с его смещением по плоской поверхности скольжения:

$$h = \frac{c \cdot (1 - \lambda_a)}{\gamma \cdot \lambda_a \cdot \operatorname{tg} \varphi}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – осредненный по слоям удельный вес грунта в пределах глубины скважины  $h$ ;  
 $\varphi$  – угол внутреннего трения;  
 $c$  – удельное сцепление;  
 $\lambda_a$  – коэффициент активного давления грунта, определяемый по следующей формуле:

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right).$$

К примеру, ориентировочные значения глубины траншеи  $h$ , вычисленные по формуле (1) для характеристик грунтов четвертичных отложений, при которой ее стенки сохраняют устойчивость, составят:

- для песка пылеватого (коэффициент пористости  $e = 0,45$ ;  $\varphi = 36^\circ$ ;  $c = 8$  кПа;  $\gamma = 18$  кН/м<sup>3</sup>) –  $h = 1,74$  м;
- для супеси пластичной ( $e = 0,45$ ;  $\varphi = 28^\circ$ ;  $c = 19$  кПа;  $\gamma = 19$  кН/м<sup>3</sup>) –  $h = 3,33$  м;
- для суглинка полутвердого ( $e = 0,45$ ;  $\varphi = 26^\circ$ ;  $c = 47$  кПа;  $\gamma = 19$  кН/м<sup>3</sup>) –  $h = 7,9$  м;
- для глины полутвердой ( $e = 0,55$ ;  $\varphi = 21^\circ$ ;  $c = 81$  кПа;  $\gamma = 19$  кН/м<sup>3</sup>) –  $h = 12,4$  м.

Согласно данным [4; 8], эффективной считается глубина барьера  $h$  не менее длины поверхностной (Рэлеевской) волны  $L_R$ .

Скорости распространения продольных  $V_p$ , поперечных  $V_s$  волн в исходной грунтовой среде определялись по общеизвестным формулам теории упругости:

$$V_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}}; \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot 2 \cdot (1 + \mu)}}. \quad (3)$$

Скорость Рэлеевской волны  $V_R$  определяется по приближенной формуле Бергманна-Викторова

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12 \cdot \mu}{1 + \mu} \cdot V_s, \quad (4)$$

где  $E$ ,  $\mu$  и  $\rho$  – соответственно динамический модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность грунта.  
 Длина Рэлеевской волны  $L_R$  определяется по формуле

$$L_R = \frac{V_R}{f}, \quad (5)$$

где  $f$  – техническая частота колебаний, Гц.

Скорости распространения волн в грунте составили: продольной  $V_p = 344,6$  м/с; поперечной  $V_s = 184$  м/с; Рэлеевской  $V_R = 171$  м/с. Соответствующие им длины волн: продольной  $L_p = 13,78$  м; поперечной  $L_s = 7,36$  м; Рэлеевской  $L_R = 6,84$  м. Коэффициент относительного демпфирования  $\xi$  принят равным 0,05. Сравнение времени распространения волн, вычисленных при помощи приведенных формул и определенных при помощи конечных элементов, показало их полную сходимость.

Эффективная глубина барьера  $h$  должна быть не менее  $L_R$  [4; 8].

В случае длительной эксплуатации барьера в виде открытой траншеи или недостаточности ее глубины  $h$  для достижения требуемого эффекта виброизоляции необходимо обеспечить устойчивость ее стенок. Достигнуть этого возможно путем устройства специального крепления стенок траншеи без распорок, соединяющих противоположные стенки траншей.

Цель данной работы – оценка эффективности вертикального виброизоляционного барьера в виде открытой траншеи с креплением ее стенок, путем математического моделирования на основании метода конечных элементов.

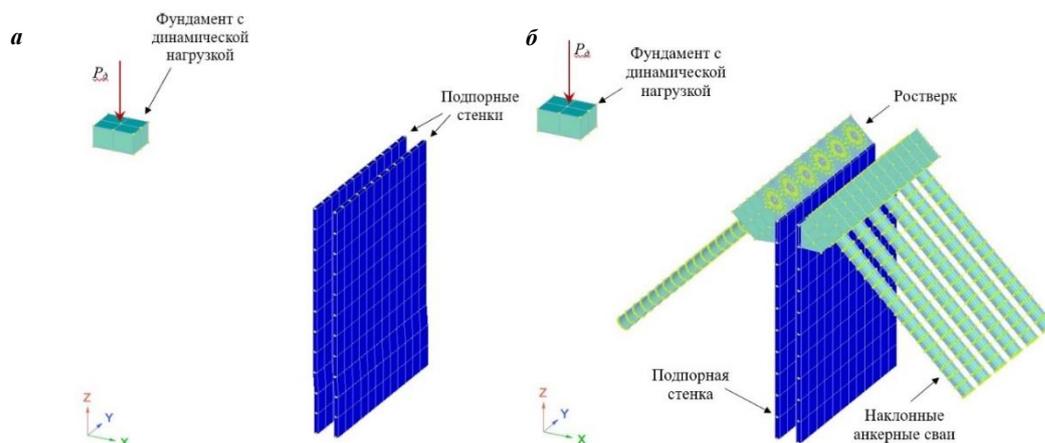
Для достижения указанной цели в рамках данной работы решены следующие задачи:

- выполнено численное моделирование методом конечных элементов вертикального барьера в виде открытой траншеи с двумя вариантами крепления ее стенок: из 2-х защемленных подпорных стенок без анкерного крепления и с дополнительным креплением наклонными анкерными сваями;
- проведен сравнительный анализ эффективности применения указанных вариантов крепления по сравнению со свободным распространением волн без препятствий.

**Численное моделирование виброотсечных барьеров.** Ввиду отсутствия возможности получения замкнутых аналитических решений, анализ эффективности грунтовой изоляции выполнен путем численного моделирования на основе метода конечных элементов на следующем примере.

Источник вибродинамических воздействий генерирует ударный импульс по железобетонному фундаменту размерами в плане 2\*2 м толщиной 1 м в виде полуволны синусоиды с вертикальным приложением динамической нагрузки с амплитудой  $P_d = 1000$  кН длительностью 0,02 с, что соответствует частоте 25 Гц. Вертикальная ось симметрии траншеи шириной 1 м расположена на расстоянии 12,5 м от точки приложения динамической нагрузки. Расчет выполнен в конечно-элементном расчетном комплексе Lira 10.8 с использованием конечных элементов, моделирующих упругое инерционное полупространство. Время интегрирования 0,3 сек. Шаг интегрирования 0,001 сек. Для исключения отражения волн от боковых и нижней границ массива применялся конечный элемент «неотражаемые границы». На рисунке 1 приводятся фрагменты расчетных схем, показывающие взаимное расположение источника вибрации и барьеров в виде траншей с креплением. Рассмотрено 3 расчетных схемы:

- 1 схема – свободное распространение колебаний в грунтовой среде без препятствий;
- 2 схема – распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен без анкерного крепления (см. рисунок 1, а);
- 3 схема – распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен с анкерным креплением (см. рисунок 1, б).



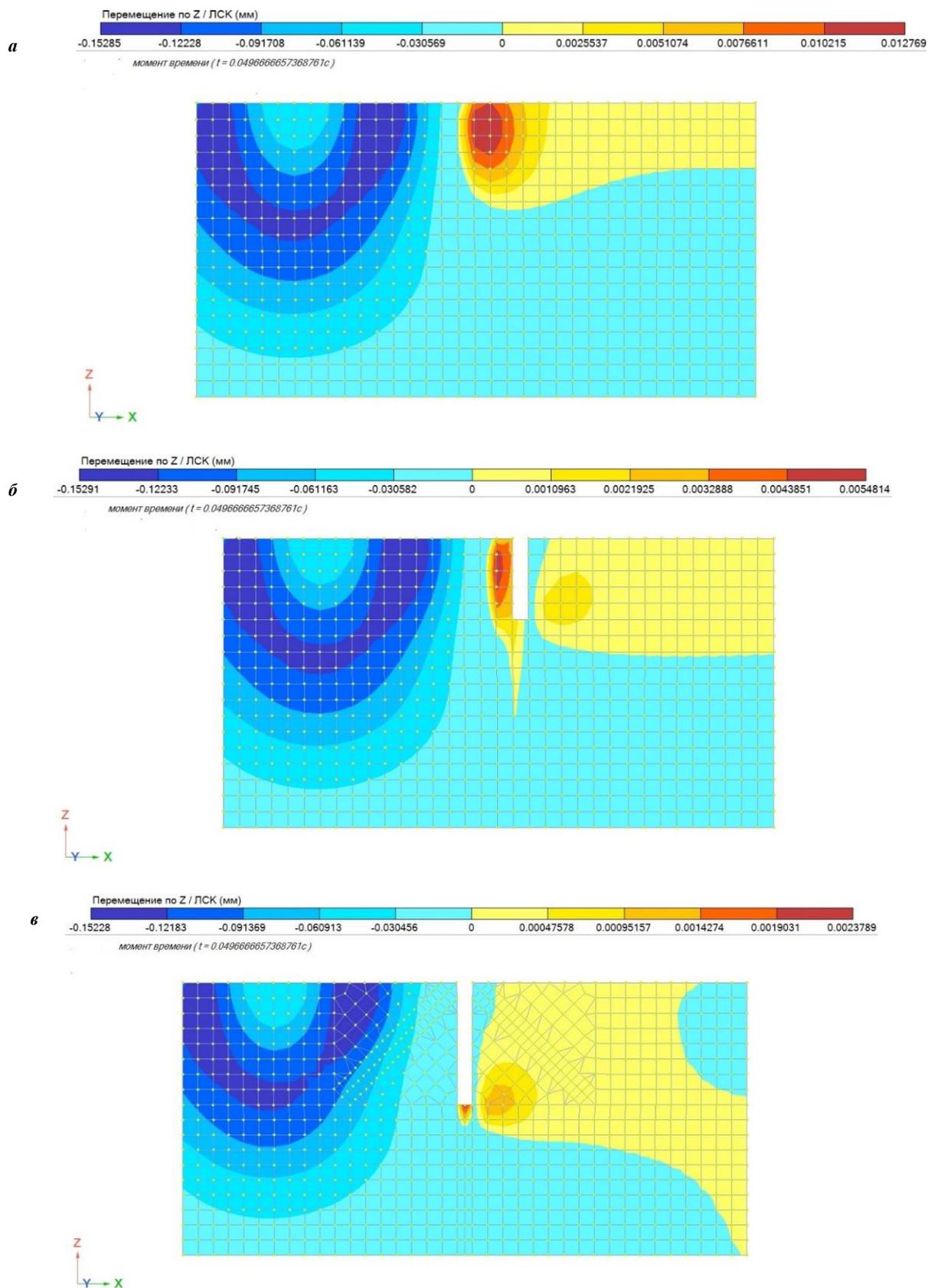
а – крепление траншеи глубиной 5 м с защемленными подпорными стенками высотой 10,6 м и толщиной 200 мм без анкерного крепления; б – крепление траншеи глубиной 8,13 м с защемленными подпорными стенками длиной 11,13 м толщиной 200 мм с креплением наклонными железобетонными сваями длиной 10 м и диаметром 400 мм

Рисунок 1. – Взаимное расположение конструкций крепления траншеи и фундамента с динамической нагрузкой

Расстояние от точки приложения нагрузки до ближайшей подпорной стенки составляет 12 м. Бетон конструкций принят класса С25/30. Грунт представляет из себя средний песок средней прочности со следующими физико-механическими свойствами: удельный вес грунта  $\gamma = 18$  кН/м<sup>3</sup>; коэффициент пористости в природном сложении  $e = 0,65$ ; динамический модуль упругости  $E_d = 150$  МПа; модуль общей деформации  $E_o = 15$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; угол внутреннего трения  $\varphi = 25^\circ$ ; удельное сцепление  $c = 1$  кПа.

Расчеты показывают, что устойчивость подпорной стенки без анкерного крепления (см. рисунок 1, а) обеспечивается при глубине траншеи  $h = 5$  м ( $0,73 L_R$ ), с креплением наклонными анкерами (см. рисунок 1, б) – при глубине  $h = 8,13$  м ( $1,19 L_R$ ).

На рисунке 2 показаны изополя вертикальных динамических амплитуд перемещений при прохождении волны через место расположения барьеров спустя 0,0497 сек. после приложения динамической нагрузки в источнике при свободном распространении (см. рисунок 2, а), наличии барьеров с 2-мя подпорными стенками (см. рисунок 2, б) с глубиной траншеи 5 м и дополнительным креплением анкерными сваями (см. рисунок 2, в) с глубиной траншеи 8,13 м.

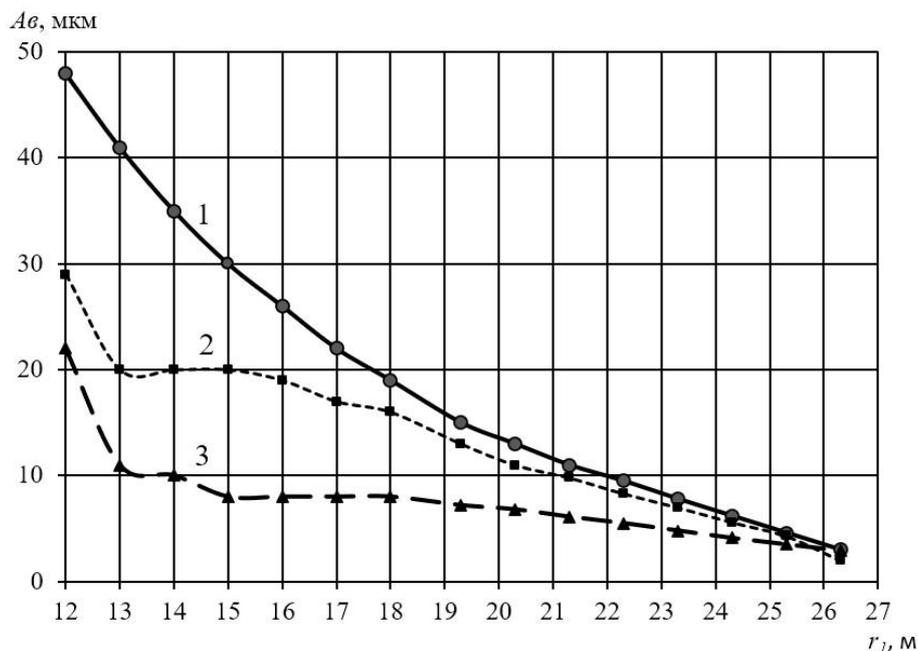


**а** – при свободном распространении (схема 1); **б** – при наличии барьера с 2-мя подпорными стенками с глубиной траншеи 5 м (схема 2); **в** – дополнительным креплением анкерными сваями с глубиной траншеи 8,13 м (схема 3)

Рисунок 2. – Изополя вертикальных динамических перемещений при прохождении волны через место расположения барьеров спустя 0,0497 сек. после приложения динамической нагрузки в источнике (вертикальный разрез расчетной схемы)

**Анализ результатов расчетов.** Из представленных на рисунке 2 данных следует, что при прохождении поверхностной волны через барьеры происходит ее искажение, сопровождающееся значительным уменьшением амплитуд вертикальных колебаний за ними. Наибольший эффект демпфирования наблюдается при использовании варианта крепления с большей глубиной траншеи (см. схему 3, рисунок 1, б; рисунок 2, в). Спектральный анализ колебаний показывает, что частота колебаний также изменяется с ростом расстояния от их источника. В зоне виброизоляции за подпорной стенкой доминирующие частоты колебаний грунта на поверхности массива составляют 12,5–14 Гц для расчетной схемы 1; 11–12,5 Гц для расчетной схемы 2 и 10–12 Гц для расчетной схемы 3.

На рисунке 3 приводятся зависимости вертикальных колебаний  $A_в$  поверхности грунтового массива от расстояния  $r_1$  от источника колебаний начиная с 12 м от точки приложения динамической нагрузки, что соответствует положению верха конструкции крепления, ближайшей к источнику колебаний.



- 1 – по схеме 1 (свободное распространение колебаний в грунтовой среде без препятствий);  
 2 – по схеме 2 (распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен без анкерного крепления);  
 3 – по схеме 3 (распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен с анкерным креплением)

**Рисунок 3.** – Зависимость амплитуды вертикальных колебаний  $A_в$  на поверхности грунтового массива от расстояния  $r_1$  от точки приложения динамической нагрузки

Для более наглядного отображения относительного демпфирования колебаний воспользуемся представлением данных в виде относительного снижения колебаний.

Для определения относительного снижения максимальных вертикальных амплитуд смещений  $A_в$  поверхности грунта за барьером от относительного расстояния  $r_2/L_R$  от оси стенки барьера, обращенной к источнику вибраций, в направлении их распространения, введем коэффициент относительного снижения амплитуды  $A_{омн}$ , который определяется по формуле:

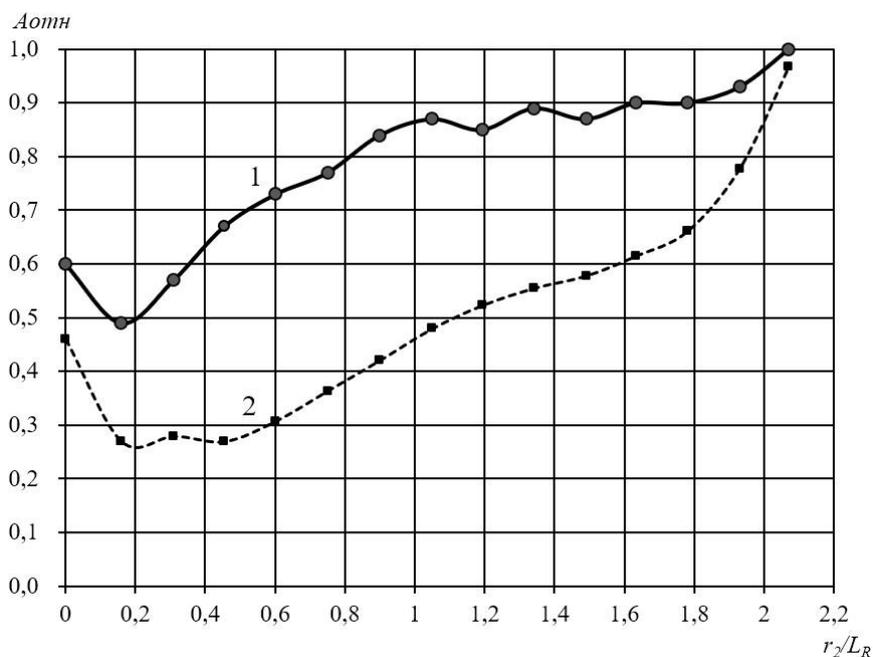
$$A_{омн} = \frac{A(r)_{after}}{A(r)_{before}}, \quad (6)$$

где  $A(r)_{after}$  – максимальная амплитуда вертикальных амплитуд смещений  $A_в$  поверхности грунта за барьером на расстоянии  $r$  от точки приложения динамической нагрузки после его устройства;

$A(r)_{before}$  – снижения максимальных вертикальных амплитуд смещений  $A_в$  поверхности грунта за барьером на расстоянии  $r$  от точки приложения динамической нагрузки до его устройства.

$r_2$  – расстояние от оси стенки барьера, обращенной к источнику вибраций, в направлении их распространения за барьером.

Зависимость  $A_{омн} = f(r_2/L_R)$  представлена на рисунке 4.



- 1 – по схеме 2 (распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен без анкерного крепления);  
2 – по схеме 3 (распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен с анкерным креплением)

Рисунок 4. – Зависимость  $A_{отн} = f(r_2/L_R)$

Из представленных на рисунке 3 и 4 данных следует, что использование открытой траншеи с креплением ее стенок обеспечивает снижение величин вертикальных амплитуд колебаний поверхности грунта за ней на расстоянии, равное  $2 L_R$ . На больших расстояниях эффект демпфирования колебаний исчезает. Этот факт также отмечается в исследовании [8]. Наибольший эффект демпфирования колебаний наблюдается на расстоянии  $(0,15–0,3) L_R$ , непосредственно за траншеей, и достигает 43% для варианта крепления по схеме 2 с глубиной траншеи, равной 5 м  $(0,73 L_R)$ , и 73% для варианта крепления по схеме 3 с глубиной траншеи равной 8,13 м  $(1,19 L_R)$ . Можно достоверно утверждать, что дальнейшее увеличение глубины траншеи повысит эффект демпфирования, но при этом требуется вводить дополнительные элементы крепления подпорных стенок траншеи для обеспечения их прочности и устойчивости. К примеру, при строительстве станции метро «Юбилейная» в г. Минск (Беларусь) глубина строительного котлована с подпорными стенами, выполненными методом «стена в грунте», и многоярусным креплением преднапрягаемыми анкерами с канатными тягами составила 29,375 м при глубине подпорных стен 36 м.

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Введение в грунтовую среду на пути распространения колебаний открытой траншеи с креплением ее стенок обеспечивает снижение величин вертикальных амплитуд колебаний поверхности грунта за ней на расстоянии, равное  $2 L_R$ . На больших расстояниях эффект демпфирования колебаний исчезает.

2. Наибольшее снижение амплитуд вертикальных колебаний поверхности грунтового массива происходит непосредственно за открытой траншеей на расстоянии, равном  $(0,15–0,3) L_R$ . Оно достигает 43% для варианта крепления стенок вертикальными защемленными подпорными стенками с глубиной траншеи, равной  $0,73 L_R$ , и 73% для варианта крепления ее стенок дополнительно наклонными анкерными сваями с глубиной траншеи равной  $1,19 L_R$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Повколас К.Э. Методика расчета дополнительных динамических осадок оснований плитных фундаментов зданий и сооружений от вибраций, распространяющихся в грунтовой среде // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 46–57. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-1-46-57.
2. Alzawi A., Hesham El Naggat M. Full Scale Experimental Study on Vibration Scattering Using Open and In-filled (Geofoam) Wave Barriers // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2011. – Vol. 31, № 3. – P. 306–317. DOI: 10.1016/j.soildyn.2010.08.010.
3. Naghizadehrokni M., Ziegler M., Sprengel J. A full Experimental and Numerical Modelling of the Practicability of thin Foam Barrier as Vibration Reduction Measure // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2020. – Vol. 139. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106416.
4. Numerical evaluation of tire chips–filled trench barriers for effective vibration isolation / K. Tandon, D. Kumar, R. Ayothiraman et al. // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. – 2023. – Vol. 42(1). – P. 325–344. DOI: 10.1177/14613484221118998.
5. Массарш К.Р. Виброизоляция с использованием газонаполненных подушек // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2006. – № 10. – С. 176–191.

6. Кузнецов С.В., Нафасов А.Э. Горизонтальные сейсмические барьеры для защиты от сейсмических волн // Вестн. МГСУ. – 2010. – Вып. 4. – С. 131–134.
7. Woods R.D. Screening of surface waves in soils // J. Soil Mech. Found. Div., ASCE. – 1968. – Vol. 94. – P. 951–977.
8. Efficiency of Open and Infill Trenches in Mitigating Ground-Borne Vibrations / T. Bose, D. Choudhury, J. Sprengel et al. // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2018. – № 144(8). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001915.

## REFERENCES

1. Povkolas, K.E. (2024). Metodika rascheta dopolnitel'nykh dinamicheskikh osadok osnovanii plitnykh fundamentov zdaniy i sooruzhenii ot vibratsii, rasprostranyayushchikhsya v gruntovoi srede [Methodology for Calculating Additional Dynamic Settlements of the Bases of Slab Foundations of Buildings and Structures from Vibrations Propagating in the Soil Environment]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 23(1), 46–57. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-1-46-57.
2. Alzawi, A. & Hesham El Naggat, M. (2011). Full Scale Experimental Study on Vibration Scattering Using Open and In-filled (Geofoam) Wave Barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(3), 306–317. DOI: 10.1016/j.soildyn.2010.08.010.
3. Naghizadehroki, M., Ziegler, M. & Sprengel, J. (2020). A full Experimental and Numerical Modelling of the Practicability of thin Foam Barrier as Vibration Reduction Measure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (139). DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106416.
4. Tandon, K., Kumar, D., Ayothiraman, R., Manna, B., & Ramana, G.V. (2023). Numerical evaluation of tire chips-filled trench barriers for effective vibration isolation. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 42(1), 325–344. DOI: 10.1177/14613484221118998.
5. Massarch, K.R. (2006). Vibroizolyatsiya s ispol'zovaniem gazonapolnennykh podushek. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, (10), 176–191. (In Russ.).
6. Kuznetsov, S.V. & Nafasov, A.E. (2010). Gorizontallye seismicheskie bar'ery dlya zashchity ot seismicheskikh voln [Horizontal seismic barriers for protection from seismic waves]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, (4), 131–134. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Woods, R.D. (1968). Screening of surface waves in soils. *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, (94), 951–977.
8. Bose, T., Choudhury, D., Sprengel, J. & Ziegler, M. (2018). Efficiency of Open and Infill Trenches in Mitigating Ground-Borne Vibrations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(8). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001915.

Поступила 05.11.2024

**ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE VERTICAL BARRIER DESIGN  
IN THE FORM OF AN OPEN TRENCH WITH FASTENING OF WALLS  
TO REDUCE VIBRATIONS PROPAGATION IN THE GROUND ENVIRONMENT**

**K. POVKOLAS, O. SHAULOUSKAYA**  
(Belarusian National Technical University, Minsk)

*The article considers the efficiency of using an open trench without filling, 1 m wide, with fastening of its walls for damping vibrations propagating in the soil environment from a point source of vibrodynamical effects. A mathematical model is formed based on the finite element method. For equal physical and mechanical properties of the soil, 3 calculation schemes are modeled: in the form of free propagation of vibrations in the soil environment without obstacles, in the form of an open trench with fastening of its walls by 2 clamped retaining slab walls and with additional fastening in the form of inclined anchor piles for a greater trench depth. According to the calculation results, it was revealed that the device of an open trench in the path of wave propagation with fastening of its walls ensures a decrease in the values of vertical amplitudes of soil surface vibrations behind it at a distance equal to two lengths of the surface wave. The greatest decrease in vibration amplitudes is noted directly behind the open trench at a distance equal to 15–30% of the length of the surface wave. It reaches 43% for the option of fastening the trench walls with vertical clamped retaining structures and 73% for the option of fastening the walls of an open trench of greater depth with additional inclined anchor piles.*

**Keywords:** vibrodynamical effects, soil environment, barrier, trench, vibration isolation, calculation, finite elements.

УДК 624.046.5

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-40-49

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕРКИ ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ В ОСОБЫХ РАСЧЕТНЫХ СИТУАЦИЯХ, ОСНОВАННАЯ НА КОНЦЕПЦИИ «PERFORMANCE BASED DESIGN (PBD)». ЧАСТЬ 1

канд. техн. наук, доц. А.В. ТУР  
(Брестский государственный технический университет)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9744-9044>

Подходы к проектированию и/или проверкам конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, включенные в предписывающие нормативно-технические документы, не только не имеют единой методологической основы, но в ряде случаев устанавливают не связанные между собой проверочные критерии и форматы безопасности. Применительно к проверкам конструктивных систем в особых расчетных ситуациях наиболее рациональным можно считать подход к проектированию, основанный на отклике/поведении (англ. *performance based design*) конструктивной системы, или еще другими словами – выходном результате (англ. *outcomes-based design*), общие положения которого для условий проектирования конструктивных систем из железобетона изложены в *fib MC 2020*. Согласно этому документу, *performance-based design* – инженерный подход к проектированию элементов здания на основе согласованных проектных целей и задач, инженерного анализа и количественной оценки соответствия альтернатив поставленным целям и задачам проектирования с использованием принятых инженерных инструментов, методологий и критериев приемки выходного результата. В статье представлены основные положения новой парадигмы проектирования конструктивных систем, основанного на выходном результате.

**Ключевые слова:** живучесть, особая расчетная ситуация, проектирование, основанное на результате, отклик конструкции, уровень повреждения.

**Введение.** В настоящее время проверки конструктивных систем в особых расчетных ситуациях выполняют согласно требованиям предписывающих норм, стандартов, указаний<sup>1,2</sup>. Как показал анализ, подходы к проектированию и/или проверкам конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, включенные в нормативно-технические документы, не только не имеют единой методологической основы, но в ряде случаев устанавливают не связанные между собой проверочные критерии и противоречивые форматы безопасности, что было показано в наших работах, например, [1]. Это особенно ощутимо при выполнении нелинейных (статических и/или динамических) расчетов с использованием конечно-элементных моделей. Согласно действующим нормам<sup>3,4</sup> в рамках принятых стратегий защиты конструктивных систем от прогрессирующего обрушения, модели сопротивлений и эффектов воздействий имеют, главным образом, полувероятностную основу метода частных коэффициентов, а проверки сводятся к выполнению детерминистических неравенств (вида  $Ed \leq Rd$  или  $C \leq C_{lim}$ ), что позволяет обойти прямое сравнение (в явном виде) мер надежности, не выполнять анализ последствий, вычисление рисков и миновать процедуру принятия решений (проектируя по принципу «так записано в нормах»). Это может быть вполне приемлемым для решения традиционных задач проектирования, но не содержит практически никакой полезной информации при проверках конструктивных систем в особых расчетных ситуациях. Таким образом, действующие в настоящее время предписывающие нормы<sup>5,6,7</sup> определяют некоторые минимальные расчетные/проектные требования, гарантирующие, главным образом, конструктивную безопасность для прогнозируемых проектных событий (воздействий) с известной изменчивостью в соответствующей расчетной ситуации.

Вероятностные нормы проектирования первого поколения<sup>8</sup> позволяют выполнять оценку поведения конструктивной системы, опираясь на вычисленную вероятность отказа  $p_f$  или связанный с ней индекс надежности  $\beta$ , опять же сводя проверки к уровню детерминистических неравенств вида ( $p_f \leq p_{tag}$  или  $\beta \geq \beta_{tag}$ ). При данном подходе последствия отказа определяют, а скорее устраняют, принимая более высокий уровень надежности при проверках предельных состояний, которые считают «критическими» с точки зрения того, что они приводят к более серьезным ожидаемым последствиям (дифференциация по классам последствий согласно СН 2.01.01<sup>9</sup>).

<sup>1</sup> СН 2.01.01-2022. Основы проектирования строительных конструкций. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 70 с.

<sup>2</sup> СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 145 с.

<sup>3</sup> См. сноску 2.

<sup>4</sup> СТБ ISO 2394-2007. Надежность строительных конструкций. Общие принципы. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2007. – 69 с.

<sup>5</sup> См. сноску 1.

<sup>6</sup> См. сноску 2.

<sup>7</sup> См. сноску 4.

<sup>8</sup> JCSS Probabilistic Model Code. Part I. Basis of Design. JCSS-OSTI /DIA/VROU-10-11-2000. URL: [https://www.jcss-lc.org/publications/jcsspmc/part\\_i.pdf](https://www.jcss-lc.org/publications/jcsspmc/part_i.pdf).

<sup>9</sup> См. сноску 1.

Однако несмотря на то, что строительные сооружения, запроектированные в соответствии с требованиями предписывающих норм, позиционируют как обладающие адекватными, а скорее неизвестными, уровнями надежности при действующих нагрузках, появление других воздействий, связанных с опасными природными и/или антропогенными событиями, может вызвать различные состояния поврежденных или потери функциональности, часто при значениях воздействий меньших, чем расчетные по проекту, что в свою очередь приводит к существенным экономическим потерям. Эти потери могут оказывать серьезное влияние на собственников, жильцов и часто имеют значительный отрицательный резонанс в обществе, его социальных и экономических институтах. Так, согласно FEMA 445<sup>10</sup>, многие критические объекты инфраструктуры, включая здания больниц, школ, пожарных депо и т.д., были выведены из эксплуатации после стихийных бедствий, даже в тех случаях, когда повреждения были относительно небольшими, что допускало их дальнейшее функционирование по назначению.

В последнее десятилетие среди специалистов возрастает понимание того, что вероятность отказа, на основе которой калибруют меры надежности в виде системы частных коэффициентов, является только одной из трех составляющих риска. Последствия отказа являются в равной степени важными составляющими риска. Как было отмечено ранее, в нормах вероятностного проектирования первого поколения<sup>11</sup> более серьезные последствия отражены лишь косвенно (через более высокие значения индексов надежности для критических предельных состояний, используемых при калибровке системы частных коэффициентов, но без необходимости выполнения анализа последствий и принятия решений).

Наконец, на функциональном уровне, предписывающие критерии (независимо от того, основаны ли они на мерах конструктивной надежности или нет) лишь создают иллюзию того, что соблюдение минимальных требований норм приводит к созданию пригодного и безопасного здания. Однако это не так. Примеры обрушений зданий и сооружений, приведенные в работах (например, в [2]), побудили к поиску методов проектирования, которые позволят ограничить до приемлемых пределов социальные, экологические и экономические последствия, что выходит за рамки традиционного проектирования. Применительно к проверкам конструктивных систем в особых расчетных ситуациях наиболее рациональным можно считать подход к проектированию, основанный на отклике/поведении (англ. *performance based design*) конструктивной системы, или еще другими словами – выходном результате (англ. *outcomes-based design*), общие положения которого для условий проектирования конструктивных систем из железобетона изложены в *fib Model Code 2020*<sup>12</sup>. Согласно *fib Model Code 2020*, *performance-based design* – инженерный подход к проектированию элементов здания на основе согласованных проектных целей и задач, инженерного анализа и количественной оценки соответствия альтернатив поставленным целям и задачам проектирования с использованием принятых инженерных инструментов, методологий и критериев приемки выходного результата.

Следует отметить, что в англоязычной технической литературе и стандартах можно найти целый ряд переводов английского слова «performance» (в силу того, что английский язык является языком диалектов, когда одному слову по написанию может соответствовать целый ряд переводов и смыслов). В общем случае, согласно ISO 6241<sup>13</sup>, данный термин наиболее лаконично определен в русской транскрипции как «поведение конструкции, здания, связанное с ее использованием (англ. *Performance-Behavior (of product) related to use*)».

В рамках данного исследования в качестве аналога принят термин «отклик» как наиболее полно, на наш взгляд, выражающий суть анализируемого явления. Применительно к особым расчетным ситуациям термин «отклик», в той мере как его связывают с особыми воздействиями, являющимися результатом реализации опасностей/угроз природного и антропогенного происхождения, обычно относят к состоянию здания после реализации угрозы, т.е. означает, по существу, уровень ожидаемого ущерба и/или величину эффектов воздействий, которым конструктивная система способна противостоять при данных идентифицированных повреждениях. Приемлемый отклик указывает на допустимые уровни повреждений и соответственно последствий (потерь) или состояния, которые в ряде случаев позволяют обеспечить непрерывную и бесперебойную работу объекта.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования в рамках данной статьи является поврежденная конструктивная система, а предметом – ее поведение (отклик) после реализации особого события с учетом полученных повреждений и последствий. Процесс проектирования конструктивной системы, основанный на отклике или требуемом выходном результате, явно оценивает ее поведение (как набор состояний) при различных условиях нагружения, связанных с потенциально опасными событиями. Этот процесс учитывает неопределенности, присущие количественной оценке частоты появления опасных событий и связанных с ними особых воздействий, оценке фактических реакций (отклика) конструктивной системы и потенциального влияния ее состояния на функциональность в зависимости от конечных проектных целей (от состояния непрерывного и бесперебойного функционирования (O) до состояния предотвращения обрушения (CP) и обрушения (C)). Идентификация поведения конструктивной системы, связанного с ее использованием, является неотъемлемой (интегральной) частью общей методологии проектирования и определяет потенциальные варианты конструктивных решений. Очевидно, что при проверках живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, когда они могут подвергаться одновременно нескольким угрозам (мультипликативной угрозе), необходимо выполнять ранжирование потенциальных опасностей не только с точки зрения частоты их появления, но и принимая во внимание последствия их реализации. Объективной мерой угрозы является величина риска, связанного с отказом. При этом в зависимости от величины

<sup>10</sup> FEMA 445. Next Generation Performance-Based Seismic Design Guidelines. – Washington, 2006. – 155 p.

<sup>11</sup> См. сноску 8.

<sup>12</sup> *fib Model Code for Concrete Structures 2020* // International Federation for Structural Concrete. – Lausanne, 2023. – 780 p.

<sup>13</sup> ISO 6241. Performance Standards in Buildings – Principles for their preparation and factors to be considered // International Standard Organization for Standardization. – Switzerland, 1984. – 9 p.

приемлемого риска определенные опасности/угрозы следует учитывать для моделирования состояний, обеспечивающих непрерывную и бесперебойную работу конструктивной системы здания, тогда как другие – для обеспечения безопасности жизнедеятельности. Следует отметить, что в настоящее время нормативные документы<sup>14,15,16,17</sup> содержат указания по проектированию на основе новой парадигмы только для сейсмостойкого строительства, за исключением, возможно, только кодекса-образца *fib* MC 2020<sup>18</sup>, который распространяет данный подход на проектирование зданий и сооружений из железобетона. Вместе с тем, на наш взгляд, такой подход не следует повсеместно предлагать в качестве простой замены проектирования по традиционным предписывающим нормам, как это сделано, например, в [3], а имеет смысл применения, главным образом, при проверках конструктивных систем ответственных зданий в особых расчетных ситуациях.

При разработке основных положений общей методологии проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях (см. схему, показанную на рисунке 1), в ее основу, с учетом рекомендаций *fib* MC 2020<sup>19</sup>, были положены следующие базовые принципы, обеспечивающие адекватное поведение конструктивной системы на протяжении всего жизненного цикла:

- проектирование следует выполнять с учетом основных требований и положений стратегии устойчивого развития согласно *fib* MC 2020<sup>20</sup> (рисунок 2);
- проектирование следует выполнять, формулируя требования к отклику (выходному результату) конструктивной системы, который обычно относят к состоянию (уровню повреждения) здания после реализации угрозы;
- следует формулировать требования к управлению жизненным циклом конструктивной системы;
- следует выполнять управление качеством и информацией на всех этапах жизненного цикла;
- следует формулировать требования к возведению и консервации здания в соответствии с разработанными техническими спецификациями;
- следует устанавливать требования к демонтажу и применять принцип цикличности использования материалов демонтированных зданий.

В рамках настоящей статьи основное внимание уделено реализации двух первых групп принципов, которые в общем случае следует рассматривать на стадии проектирования, в частности при проверках живучести в особых расчетных ситуациях.

Методология выполнения проверок живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях рассматривается как интегральная/составная часть общей методологии проектирования конструктивных систем, основанной на отклике (поведении, связанном с ее использованием) с учетом стратегии устойчивого развития (см. рисунок 2).

**Проектирование, основанное на отклике (выходном результате) как новая парадигма проверки конструктивных систем в особой расчетной ситуации.**

**Краткая историческая справка и базовая концепция новой парадигмы проектирования.** До настоящего времени процесс проектирования и строительства остается относительно традиционным, основанным исключительно на т.н. передовом опыте, реализованном в нормах, правилах и стандартах, предписанных законом, которые в силу того, что они пересматриваются через достаточно большие временные интервалы, все-таки подавляют инновации. Строительные нормы и правила существуют по очень простой причине: они созданы для того, чтобы обеспечить в проектируемом здании «безопасную для жизни» среду.

Проектирование, основанное на отклике/выходном результате, как формальный процесс возникло в 1990-х годах в ответ на проблему сейсмостойкого строительства, когда требования к прочностным и деформационным характеристикам материалов, приведенные в нормах и применяющиеся при проектировании новых зданий, не могли быть практически или надежно применены для оценки и модернизации существующих зданий. Подготовка первоначального набора процедур для проектирования сейсмостойких конструкций на основе эксплуатационных характеристик началась в 1992 году в рамках программы FEMA<sup>21</sup> по снижению сейсмической опасности существующих зданий. В этих документах была изложена первоначальная концепция оценивания уровня ущерба при различных уровнях опасности. Процедуры первого поколения ввели понятие выходного результата в терминах дискретно определяемых ожидаемых уровней повреждения/ущерба: обрушение (C), предотвращение обрушения (CP), безопасность для жизни (LS), немедленное заселение (IO) и эксплуатация (O) (рисунок 3). Они также ввели понятие выходного результата, связанного с повреждением как конструктивных, так и неконструктивных элементов. Проектные цели (или целевые показатели отклика) были разработаны путем привязки одного из этих уровней повреждений к определенному уровню сейсмической опасности/особого воздействия. Расчетные процедуры первого поколения также включали в себя набор аналитических процедур различной сложности, которые можно было использовать для моделирования сейсмической реакции здания, а также предоставляли исчерпывающий набор рекомендаций по методам нелинейного анализа и критериям приемки. Эти процедуры

<sup>14</sup> См. сноску 10.

<sup>15</sup> FEMA 273. Report, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. – Washington, 1997. – 435 p.

<sup>16</sup> FEMA P-58-6. Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Buildings. – Washington, 2018. – 92 p.

<sup>17</sup> FEMA 356. Prestandard and Commentary for the for the Seismic Rehabilitation of Buildings. – Washington, 2020. – 519 p.

<sup>18</sup> См. сноску 12.

<sup>19</sup> См сноску 12.

<sup>20</sup> См. сноску 12.

<sup>21</sup> См. сноску 15.

в методах первого поколения представляли собой важное усовершенствование по сравнению с действующими на тот момент строительными нормами и правилами, поскольку они обеспечивали системный подход к проектированию зданий для достижения желаемого уровня выходного результата.

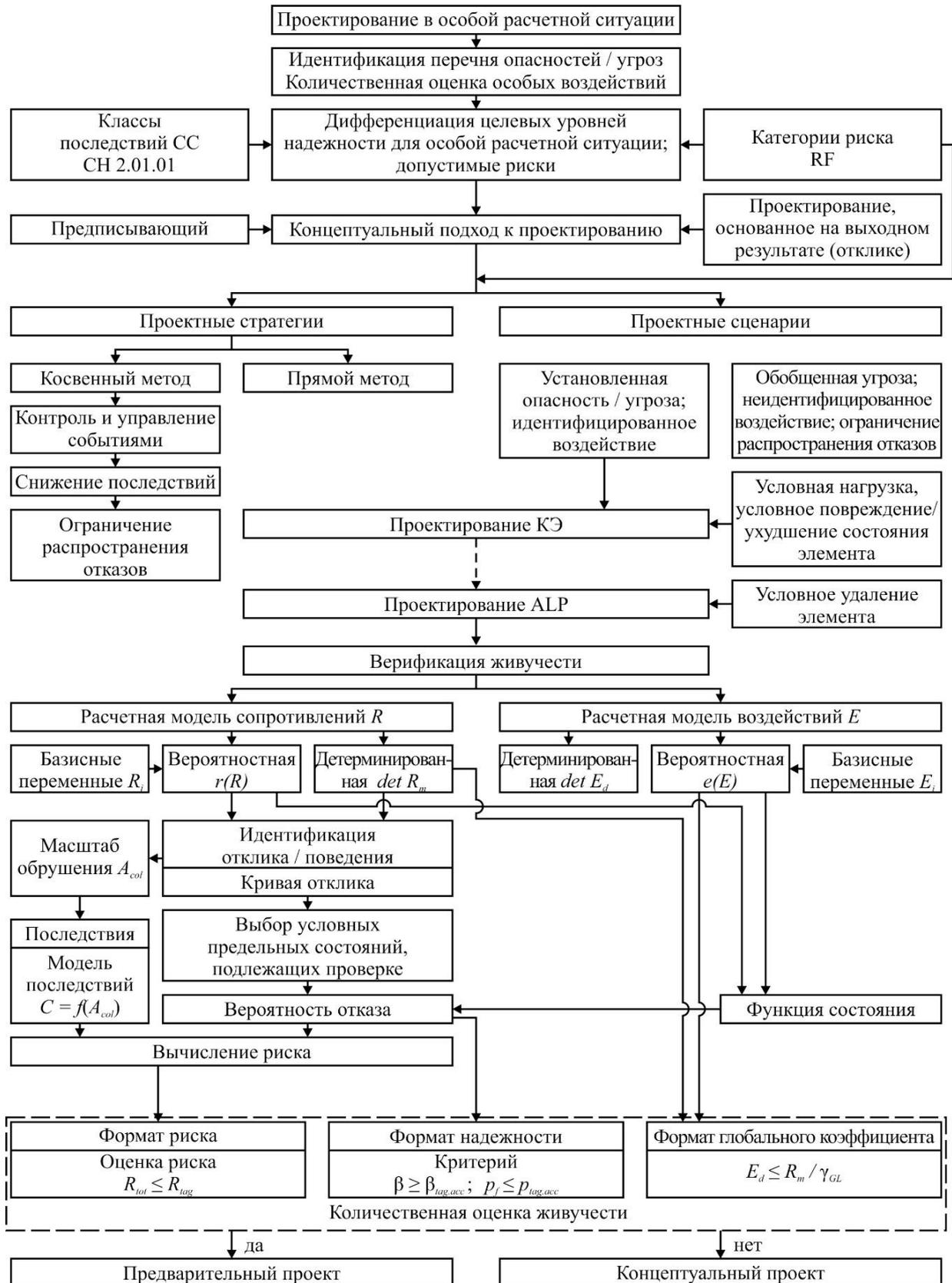
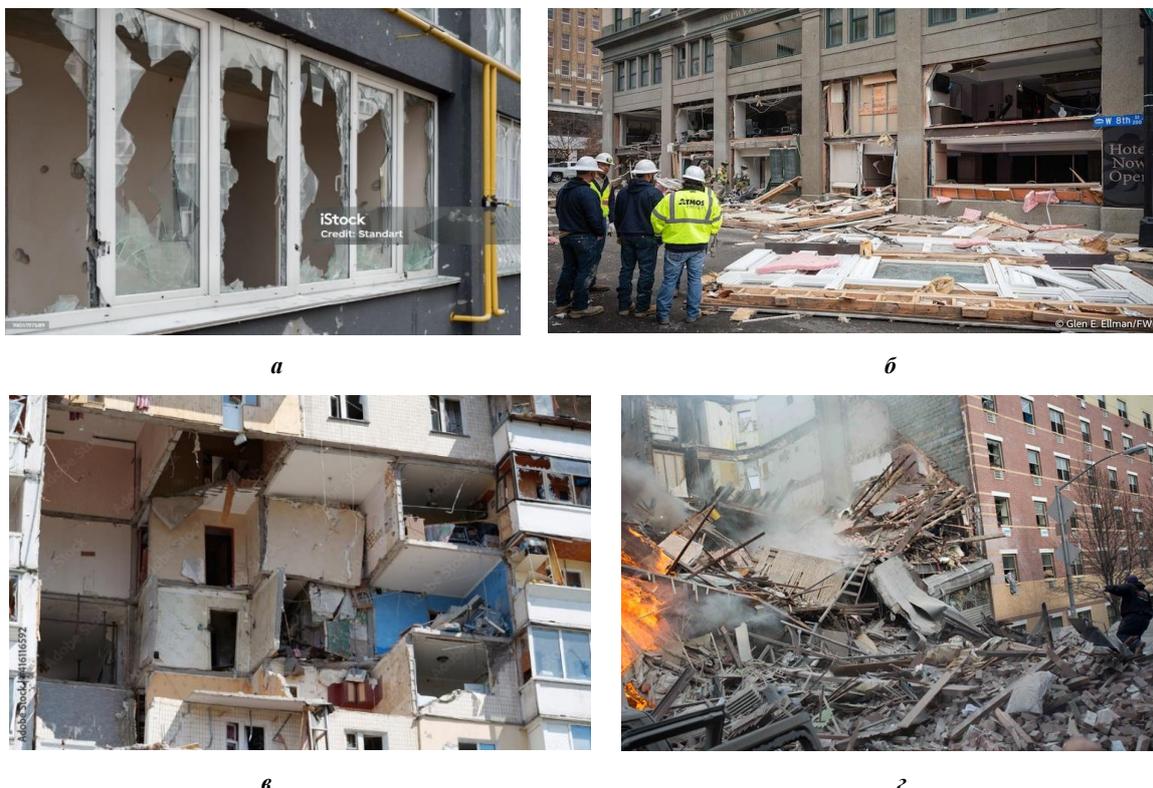


Рисунок 1. – Обобщенная методология проверки живучести конструктивной системы в особой расчетной ситуации



Рисунок 2. – Проектирование с учетом стратегии устойчивого развития согласно *fib* MS 2020<sup>22</sup>

В настоящее время практика проектирования сейсмостойких конструкций, основанная на выходном результате, в целом, базируется на применении процедур и критериев, содержащихся в стандарте FEMA<sup>23</sup> и комментариях к нему<sup>24</sup>.



*а* – Ю (непосредственное заселение); *б* – LS (безопасность жизнедеятельности);  
*в* – СР (предотвращение обрушения); *г* – С (обрушение)

Рисунок 3. – Уровни повреждений конструктивной системы после реализации особого события

<sup>22</sup> См. сноску 12.

<sup>23</sup> См. сноску 16.

<sup>24</sup> См. сноску 17.

Комиссией CIB W060 был подготовлен отчет № 64<sup>25</sup>, в котором отмечается, что «прежде всего, подход к проектированию на основе выходных результатов – это практика мышления и работы с точки зрения достижения конечных целей, а не средств, применяемых для их достижения. Это связано с тем, какие результирующие требования к параметрам поведения ожидают от здания или строительного продукта, а не с предписанием, как оно должно быть запроектировано и построено».

Это определение является самым первым и основным определением подхода к проектированию зданий, основанному на выходном результате, и до сих пор используется во многих современных исследованиях и стандартах<sup>26</sup>.

Таким образом, проектирование на основе выходного результата определяется как концепция, в соответствии с которой от конструкции/конструктивной системы требуют достижения желаемого уровня удовлетворенности заинтересованных сторон выходным результатом, соблюдая при этом установленные нормами требования к выходному результату, однако без указания условий того, как этот результат должен быть достигнут с помощью конкретных материалов, конструктивных требований или методов возведения.

В соответствии с данной концепцией все принимаемые решения сосредоточены на достижении требуемых выходных результатов, а также на тестировании и оценках его основных технических параметров как непосредственно после ввода, так и в процессе эксплуатации. Данный подход можно использовать независимо от того, выполняется ли оценивание существующих или проектирование новых зданий. Он применим как при приемке возведенных строительных сооружений, так и к любой фазе/этапу всего жизненного цикла здания.

Таким образом, дополнительно принимая во внимание требования стратегии устойчивого развития, согласно *fib* MC 2020<sup>27</sup>, конструкция и элементы конструкции/конструктивной системы должны быть запроектированы, возведены и обслуживаться таким образом, чтобы в течение всего жизненного цикла они функционировали адекватно и надлежащим образом отвечали требованиям к социальному, экологическому и экономическому аспектам отклика (см. рисунок 2).

Для сравнения: согласно СН 2.01.01<sup>28</sup>, основной принцип проектирования формулируется следующим образом: «конструкции и элементы конструкций следует проектировать, изготавливать и обслуживать таким образом, чтобы они в течение проектного срока эксплуатации с назначенным уровнем надежности и без необоснованных экономических затрат обеспечивали выполнение следующих основных требований: несущей способности (безопасности); эксплуатационной пригодности; долговечности; живучести».

Согласно данным<sup>29</sup> и [4], концепция проектирования, ориентированного на выходной результат, основана на двух ключевых положениях:

- использовании двух языков, один из которых применяют для формулирования требований клиентов/пользователей (языка требований спроса), а другой – для задания результирующих количественных требований к целевым параметрам поведения/состояний, которые должны обеспечить удовлетворение спроса. Важно понимать, что эти языки разные;
- необходимости выполнения проверки полученных выходных результатов на соответствие целевым показателями, установленным на стадии согласования требований с заинтересованными сторонами.

Следует отметить, что с развитием методов проектирования, основанных на отклике, инженеры-практики стали лучше разбираться в их концепциях. Проектирование сейсмостойких конструкций на основе отклика стало неотъемлемой частью инженерной практики, а использование передовых методов нелинейного анализа становится все более распространенным.

Таким образом, проектирование, основанное на поведении конструкции, связанном с ее использованием (*performance-based design*), заменяет традиционный предписывающий подход к проектированию процессом проектирования, направленным на обеспечение коммуникационной связи между разрабатываемым проектом и ожидаемым выходным результатом, выраженном в функциях здания/ожидаемом ущербе, требования к которым формулируют владельцы и жильцы совместно с проектировщиками и другими заинтересованными сторонами.

Как правило, основными заинтересованными сторонами являются учредители, владельцы, жильцы, пользователи, соседи (если строительство им мешает), подрядчик, проектная и строительная группа, группа управления арендой и обслуживания. Другими заинтересованными сторонами могут быть правительство и общество. Хотя заинтересованные стороны обычно полагают, что они знают, какие критерии эффективности им следует определить для конструкции, для распознавания неполных, неоднозначных или противоречивых требований необходимы профессиональные навыки и опыт в области проектирования конструкций.

Следует отметить, что данные требования, формулируемые заказчиком (владельцем, жильцом, пользователем и т.д.), не только включают, но довольно часто превосходят традиционные требования безопасности жизнедеятельности, которые заложены в действующих в настоящее время предписывающих нормах и стандартах. Повышенные требования часто распространяются на предотвращение или ограничение до приемлемого уровня как

<sup>25</sup> Performance-Based Buildings – CIB Working Commission W060: CIB Report; Publication № 40, January, 1985.

<sup>26</sup> См. сноски 10, 12, 15, 16, 17.

<sup>27</sup> См. сноску 12.

<sup>28</sup> См. сноску 1.

<sup>29</sup> См. сноску 25.

экономических (монетарных) потерь, так и нарушения функций здания в процессе эксплуатации. Определение уровня требуемых технических характеристик конструктивной системы (уровня показателей предельного состояния) для данного сценария угроз и количественная оценка последствий для владельца/собственника в случае возникновения такой угрозы, приводящей к отказу элементов конструкции и конструктивной системы в целом, обеспечивает основу для принятия обоснованных технических решений.

При использовании данного подхода конструкцию или элемент конструкции проектируют так, чтобы они функционировали надлежащим образом в течение всего жизненного цикла, предусмотренного проектом. Эксплуатационные качества здания оценивают путем проверки соответствия поведения конструкции или элемента конструкции, связанного с ее использованием, заданным требованиям. При проектировании объектов с учетом особых расчетных ситуаций большое значение имеет не только выполнение критериев несущей способности конструкции (обеспечения безопасности жизнедеятельности), но также обеспечение непрерывности использования (функционирования), что склоняет к применению философии проектирования, опирающейся на анализ требований к отклику конструктивной системы.

**Предпосылки для применения нового подхода.** Основные предпосылки для практического проектирования, основанного на поведении конструкции, связанном с ее использованием, заключаются в том, что:

а) уровни требуемых технических параметров здания могут быть определены/выражены количественно и адаптированы к потребностям заинтересованных сторон;

б) методы инженерных расчетов, основанные на моделировании поведения конструкций при различных видах воздействий, развились до такой степени, что отклик здания (строительного сооружения) при монотонном возрастании нагрузки (или вынужденной деформации) до наступления анализируемого предельного состояния, в том числе во времени, с достаточной уверенностью можно предсказать численно при использовании виртуальных компьютерных моделей [1];

в) неопределенности расчетных моделей сопротивлений и эффектов воздействий можно выявить и статистически смоделировать, что даст возможность вычислить вероятности отказа конструкции/конструктивной системы;

г) существующие эмпирические модели позволяют вычислять, хотя пока и с большой неопределенностью, последствия отказа в терминах предполагаемого числа жертв;

д) вычисленные вероятности и последствия отказа дают возможность вычислить риски. При этом, риском, связанным с отказом конструктивной системы, можно управлять, снижая его до приемлемого уровня.

**Новая парадигма проектирования против предписывающего подхода.** Предписывающий подход описывает способ создания строительного сооружения, но не конечный результат процесса строительства, и связан с типом и качеством используемых материалов, методом строительства и качеством изготовления/возведения. Этот подход основан на прошлом опыте и консолидированных ноу-хау, строго регламентирован сочетанием законов, норм, стандартов, правил. Требования предписывающих норм и стандартов являются, как правило, следствием произошедшего несчастного случая, повлекшего за собой телесные повреждения или смерть людей, который требует средств правовой защиты, чтобы избежать повторения. Предписывающий подход представляет собой техническую процедуру, которая состоит в сравнении расчетных технических параметров проекта предлагаемого здания с требованиями действующих норм и стандартов. Поэтому для процесса проектирования и строительства не требуются инструменты, позволяющие выполнять моделирование поведения конструктивных систем или их проверки в процессе эксплуатации. Следовательно, большинство зданий проектируются так, чтобы они оставались конструктивно безопасными для жизни людей после реализации проектных событий, только с намерением того, что конструкция не обрушится в случае события, которое произойдет за пределами проектных состояний в постоянной расчетной ситуации. Даже если конструктивный ущерб будет предотвращен, весьма вероятно, что эти здания будут пустовать в течение длительного времени из-за дорогостоящего ремонта и замены ненесущих элементов.

Новый подход к проектированию, основанный на требованиях к выходному результату (отклику конструкции/конструктивной системы), начал формироваться, как было показано выше, во второй половине XX-го века, когда строительные рынки отдельных стран столкнулись с тем, что им нужна большая гибкость в процедурах закупок, чтобы облегчить обмен продуктами строительной отрасли и товарами между странами и повысить темпы внедрения инноваций в строительстве. Этот инновационный подход к закупкам, проектированию, заключению контрактов, управлению и обслуживанию зданий был основан на концепции проектирования зданий, ориентированного на требования к параметрам отклика или конечного результата.

При выборе концептуального подхода к проектированию следует иметь ввиду следующее обстоятельство. Несмотря на то, что конструкция запроектирована с использованием актуальных норм, правил и стандартов, основанных на установленных неявно уровнях надежности (т.н. вероятно обоснованные нормы первого поколения), никто не может гарантировать, что она не будет повреждена или не обрушится в процессе эксплуатации, особенно когда речь идет о появлении особых воздействий. Но если мы осуществим проектирование, базирующееся на требованиях к выходному результату, основываясь на количественной оценке уровня угроз и соответствующих особых воздействий, для которых рассчитывают отклик конструкции, тогда это может повысить безопасность жизнедеятельности, в частности в особых расчетных ситуациях, через реализацию процедуры управления рисками. Ключевым аспектом в предлагаемом подходе к проектированию является устойчивость конструктивной

системы, в широком смысле определяемая как способность заранее быть готовой к тому, что она будет «поглощать» прогнозируемые неблагоприятные события, «восстанавливаться» и «адаптироваться» к ним после их реализации. Данный подход одновременно усиливает и улучшает методы обеспечения общей устойчивости, контролируя потенциальный ущерб, который здание может получить от реализации особых воздействий.

Предлагаемый в настоящей работе подход к проектированию систем в особых расчетных ситуациях совместим с приведенным выше основным определением, предполагающим, что проектирование на основе параметров поведения конструкции, связанного с ее использованием, относится к мышлению и принципу работы, что соответствует больше целям, чем используемым средствам. «Проект, основанный на требованиях к отклику или выходному результату, – это проект здания, основанный на наборе специальных требований к характеристикам, связанных с предполагаемым использованием здания, и который может быть оценен на основе его поведения с учетом прогнозируемых повреждений»<sup>30</sup>. Таким образом, процесс проектирования, основанный на выходном результате, определяется как «процесс, в котором требования к результирующим параметрам поведения переводятся и интегрируются в проект здания».

Здание, построенное по проекту, разработанному на основе данного подхода, должно соответствовать определенным измеримым или предсказуемым/прогнозируемым значениям конечных технических параметров, которые описывают конкретные требования к выходным результатам, таким как, например, конструктивная безопасность, энерго-эффективность, сейсмическая стойкость, огнестойкость и т.д., без применения специально предписанного метода, разработанного для достижения этих требований. Это контрастирует с требованиями традиционных предписывающих строительных норм, которые устанавливают определенные методы проектирования и строительства (например, размеры сечения стойки и расстояние между стойками в конструкции деревянного каркаса, минимальный коэффициент армирования или минимальная толщина защитного слоя в железобетонной балке и т.д.). Такой подход обеспечивает свободу при разработке и выборе инструментов и методов для оценки всего жизненного цикла строительного объекта, в том числе с применением компьютерных моделей, позволяющих создать виртуальную реальность при помощи слов от деловых отношений до закупок, строительства и оценки результатов.

Принятие данного подхода сохраняет необходимость соблюдения базовых требований действующих норм, правил, стандартов. Однако, данный подход предлагает четкие пути устранения некоторых более консервативных требований там, где они не нужны, предоставляя возможности для реализации инновационных проектных решений (конструкционных или иных), которые еще не определены и не прописаны в действующих нормах. Хотя преимущества применения данного подхода значительны, признано, что его использование на любом этапе строительного процесса является более сложным и дорогостоящим, чем использование более простого предписывающего подхода. Таким образом, применение этого подхода не следует рассматривать как самоцель. Когда речь идет о традиционном строительстве или используются хорошо зарекомендовавшие себя методы проектирования и технологии, использование предписывающих норм становится более эффективным, действенным, быстрым или менее затратным, поэтому предписывающие спецификации будут по-прежнему полезны во многих расчетных ситуациях. В то же время для сложных проектов, проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях использование подхода, основанного на результатах, эффективно на каждом этапе.

Основные отличия подходов к проектированию на основе предписывающих норм и требований к параметрам отклика можно обобщить следующим образом.

Во-первых, одно из главных отличий между рассматриваемыми подходами заключается в целях проектирования, как показано на рисунке 4. В то время как цели предписывающего проектирования требуют достижения приемлемого соотношения сопротивления и эффекта воздействия ( $R/E$ ) или проверки соответствующего детерминистического неравенства ( $R_d \geq E_d$ ), целью нового концептуального подхода является достижение определенного уровня надежности, коррелирующего с уровнем повреждения и соответствующими последствиями, которые могут быть измерены несколькими способами, включая монетарные затраты. Каждый из этих методов требует итераций в процессе проектирования до тех пор, пока не будет достигнуто приемлемое соотношение  $R/E$  (для предписывающего проектирования) или желаемый уровень предельного повреждения (последствий) (для проектирования, основанного на требованиях к выходному результату).

Еще одно различие между парадигмами предписывающего проектирования и проектирования, основанного на результирующих требованиях к отклику конструкции, заключается в их вычислительной основе. Для предписывающего проектирования это относится к соотношению сопротивление/воздействие (эффект воздействия) и основано, главным образом, на методах конструкционной надежности. Новый подход основан на методах управления рисками, которые учитывают перечень угроз, вероятности отказа и последствия реализации особого события.

Третье важное различие между этими двумя подходами заключается в шагах, которые предпринимаются при рассмотрении проектных решений. Для традиционных предписывающих методов уровень особого воздействия и допустимый уровень повреждения конструкции определяются действующими строительными нормами и стандартами, как правило, неясно в терминах усилий (эффектов воздействий). При проектировании, основанном на поведении конструкции, связанном с ее использованием, помимо этих уровней в процессе проектирования учитывают также ожидаемые последствия и неопределенности. Эти решения основаны на допуске уровня предельных повреждений, а не на заранее определенном наборе норм и правил.

<sup>30</sup> См. сноску 12.

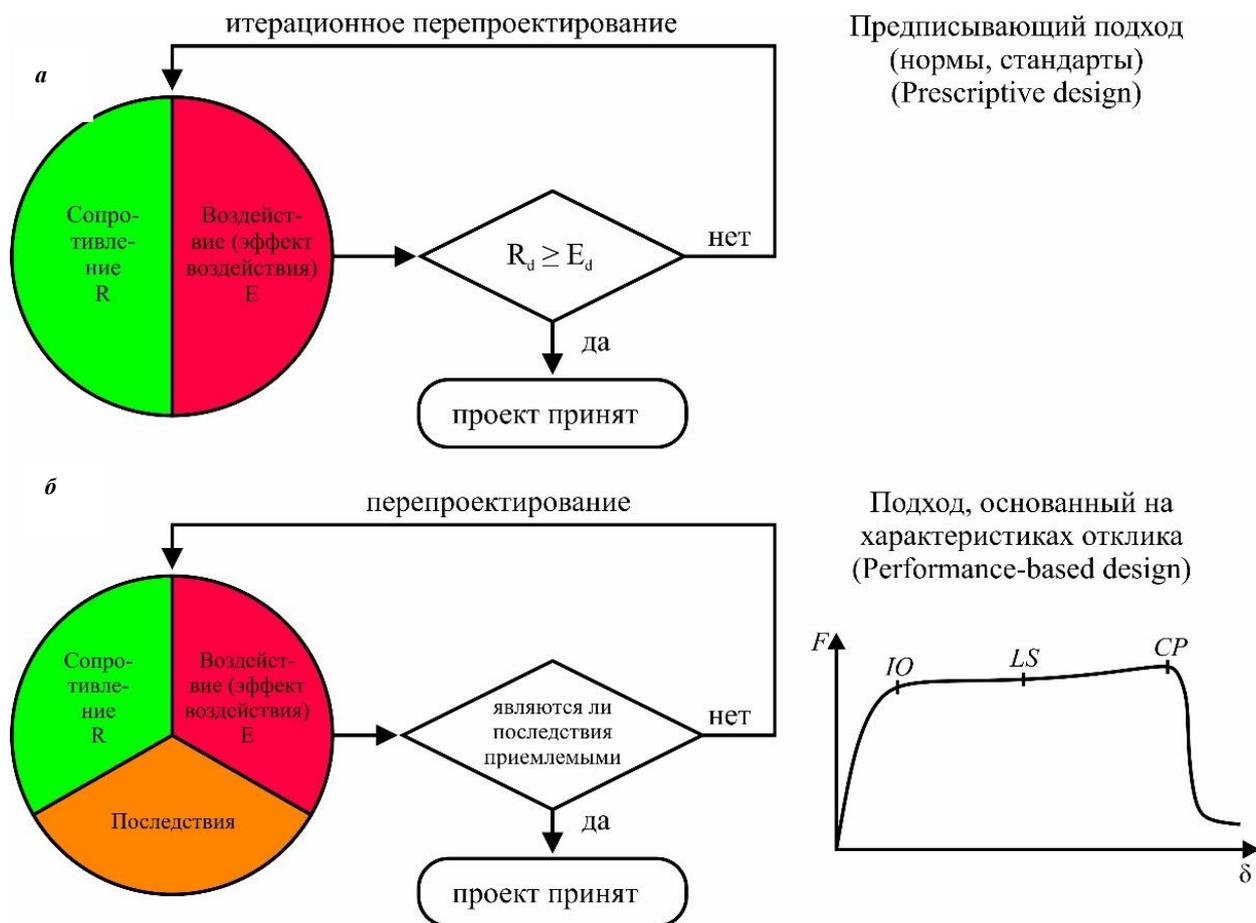


Рисунок 4. – Принципиальные схемы реализации предписывающего подхода к итерационному проектированию (а) и подхода, основанного на выходном результате (б)

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках отдельного проекта научно-исследовательской работы Министерства образования Республики Беларусь «Разработка методики установления допустимых значений мер надежности в критериях живучести поврежденных конструктивных систем из железобетона, применяемых при проверках их устойчивости к прогрессирующему обрушению от чрезвычайных воздействий» (№ гос. регистрации 20231582).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лизогуб А.А., Тур А.В., Тур В.В. Вероятностный подход к оценке живучести конструктивных систем из сборного и монолитного железобетона // Стр-во и реконструкция. – 2023. – Т. 108, № 4. – С. 93–105.
2. Proske D., Schmidt M. Comparison of the collapse frequency and failure probability of buildings / Acta Polytechnica CTU Proceedings. – 2022. – Vol. 36. – P. 161–166. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0161.
3. Колубков А.А. Параметрический метод нормирования. Постоянное стремление к изменениям [Электронный ресурс] // АВОК. – 2023. – № 8. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=8588](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=8588).
4. Galinski J.L. Performance-Based Design // Continuing Education and Development. – NJ: Woodcliff Lake, 2023. – 17 p.

#### REFERENCES

1. Lizogub, A.A., Tur, A.V. & Tur, V.V. (2023). Veroyatnostnyi podkhod k otsenke zhivuchesti konstruktivnykh sistem iz sbornogo i monolitnogo zhelezobetona [Probabilistic Approach for Assessing the Robustness of Structural Systems Made of Precast and Monolithic Reinforced Concrete]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 108(4), 93–105. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Proske, D. & Schmidt, M. (2022). Comparison of the collapse frequency and failure probability of buildings. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, (36), 161–166. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0161.
3. Kolubkov, A.A. (2023). Parametricheskii metod normirovaniya. Postoyannoe stremlenie k izmeneniyam [Parametric Normalization Method. Constant Desire for Change]. *ABOK*, (8). URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=8588](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=8588). (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Galinski, J.L. (2023). Performance-Based Design. *Continuing Education and Development*. NJ: Woodcliff Lake.

Поступила 30.11.2024

**PERFORMANCE BASED DESIGN METHODOLOGY FOR VERIFICATION THE ROBUSTNESS OF STRUCTURAL SYSTEMS IN ACCIDENTAL DESIGN SITUATIONS. PART 1****A. TUR****(Brest State Technical University)**

*Approaches to the design and/or checking of structural systems in accidental design situation included in prescriptive regulatory and technical documents not only do not have a single/uniform methodological basis, but in some cases establish unrelated verification criteria and safety formats. With regard to checking of structural systems in accidental design situations, the most rational approach to design can be considered based on the response/behavior (performance based design) of a structural system or, in other words, the output result (outcomes-based design), the general provisions of which for the design conditions of RC – structural systems are set out in fib MC 2020. According to this document, performance-based design is an engineering approach to the design of building elements based on agreed design goals and objectives, engineering analysis and quantitative assessment of the compliance of alternatives with the set design goals and objectives using accepted engineering tools, methodologies and criteria for acceptance of the output/outcomes result. The article presents the main provisions of the new paradigm of designing constructive systems based on the output result.*

**Keywords:** *robustness, accidental design situation, performance-based design, response, damage level.*

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕРКИ ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ В ОСОБЫХ РАСЧЕТНЫХ СИТУАЦИЯХ, ОСНОВАННАЯ НА КОНЦЕПЦИИ «PERFORMANCE BASED DESIGN (PBD)». ЧАСТЬ 2

канд. техн. наук, доц. А.В. ТУР  
(Брестский государственный технический университет)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9744-9044>

Подходы к проектированию и/или проверкам конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, включенные в предписывающие нормативно-технические документы, не только не имеют единой методологической основы, но в ряде случаев устанавливают не связанные между собой проверочные критерии и форматы безопасности. Применительно к проверкам конструктивных систем в особых расчетных ситуациях наиболее рациональным можно считать подход к проектированию, основанный на отклике/поведении (англ. *performance based design*) конструктивной системы, или еще другими словами – выходном результате (англ. *outcomes-based design*), общие положения которого для условий проектирования конструктивных систем из железобетона изложены в *fib MC 2020*. Согласно этому документу, *performance-based design* – инженерный подход к проектированию элементов здания на основе согласованных проектных целей и задач, инженерного анализа и количественной оценки соответствия альтернатив поставленным целям и задачам проектирования с использованием принятых инженерных инструментов, методологий и критериев приемки выходного результата. В статье представлены основные положения новой парадигмы проектирования конструктивных систем, основанного на выходном результате.

**Ключевые слова:** живучесть, особая расчетная ситуация, проектирование, основанное на результате, отклик конструкции, уровень повреждения.

**Многоуровневая система требований, основанных на результате.** Процесс многоуровневого проектирования зданий на основе поведения конструкции, связанного с ее использованием, включает следующие основные этапы:

- установление, сбор и формулирование основных вербальных и качественных требований пользователей к возведенному зданию, в том числе при/после реализации особого воздействия;
- преобразование вербальных качественных требований, сформулированных пользователями, в технические требования к эксплуатационным качествам (состояниям) и количественные критерии для оценки их поведения конструктивной системы в процессе проектирования;
- оценка соответствия технических характеристик конструктивных решений заявленным критериям соответствия с использованием надежных инструментов, включая вероятностный анализ и анализ рисков.

Строительный объект представляет собой многокомпонентную систему, имеющую, как правило, относительно продолжительный жизненный цикл. Программа проектирования конструктивной системы в целом и более конкретные цели проектирования ее частей исходят из соответствующих требований, сформулированных пользователем. Эти требования превращаются в набор требований к конкретным техническим параметрам законченного здания, которые, как отмечалось ранее, должны быть установлены с участием всех заинтересованных сторон. Упрощенная блок-схема процесса проектирования, основанного на выходном результате для полного жизненного цикла, показана на рисунке 1.

Формулирование основных требований к поведению конструкции, связанному с ее использованием, в качестве альтернативы нынешним предписывающим нормам, согласно *fib Model Code 2020*<sup>1</sup>, основано на рассмотрении четырех основных уровней взаимосвязанных требований, технических спецификаций, результатов испытаний, т.е. требований, основанных на результатах (англ. *outcomes-based requirements*), а именно (см. рисунок 2):

**Уровень 1.** Требования наиболее высокого уровня, основанные на результатах, формулируемых владельцем и пользователем/заинтересованными сторонами.

Наиболее важной отправной точкой новой парадигмы проектирования является точное определение согласованных требований к выходному результату/отклику. Заинтересованные стороны должны установить требования к целям, которым конструкция или элемент конструкции должны отвечать в течение жизненного цикла. Потребности заинтересованных сторон, а также установленные законом ограничения и требования нормативных документов являются основой для определения/формулирования требований к параметрам отклика конструкции или выходному результату. Соответственно, выполнение требований к отклику/результату относится к выполнению основных требований заинтересованных сторон.

<sup>1</sup> *fib Model Code for Concrete Structures 2020* // International Federation for Structural Concrete. – Lausanne, 2023. – 780 p.



Рисунок 1. – Схема проектирования здания на основе методологии «performance-based design» с учетом обеспечения требований полного жизненного цикла согласно *fib Model Code 2020*<sup>2</sup>



Рисунок 2. – Упрощенная схема многоуровневого подхода к проектированию на основе выходного результата для полного жизненного цикла здания с акцентом на блоки «Требования»-«Верификация» согласно *fib Model Code 2020*<sup>3</sup>

<sup>2</sup> См. сноску 1.

<sup>3</sup> См. сноску 1.

В основном это качественные требования, и их трансформация в количественную оценку является особым шагом в процессе проектирования. Функциональная концепция предполагаемого строительного сооружения, излагаемая пользователем, зачастую представляет собой набор неопределенных в количественном выражении целей и требований, которым должны удовлетворять принимаемые конструктивные решения и которые далее должны быть преобразованы в требования к конкретным параметрам отклика (см. рисунок 2). Требования пользователей выражаются в средствах и условиях функционирования, под которые проектируют здание в соответствии с назначенной целью, независимо от того, где оно расположено.

При определении основных требований, основанных на результате, следует иметь в виду, что профиль пользователя может содержать широкий круг лиц, включая постоянных пользователей здания, посетителей, персонал здания, персонал в зданиях, предоставляющих общественные услуги, животных в зданиях сельскохозяйственного назначения. В соответствии с положениями стратегии устойчивого развития, требования заинтересованных сторон должны быть сформулированы с учетом всех трех основных компонентов стратегии устойчивого развития и аспектов поведения конструкции, связанного с ее использованием (социального, экологического и экономического аспектов отклика).

**Уровень 2.** Требования, формулируемые техническими консультантами, инженерами и другими специалистами по разработке, оценке и т.д., а также составление технических спецификаций конечных характеристик конструкции. Технические консультанты, инженеры и другие специалисты должны быть в состоянии преобразовать/трансформировать требования, основанные на выходном результате более высокого уровня, сформулированные владельцем/пользователем/заинтересованными лицами в детализированные стратегии и технические спецификации, содержащие требования к конечному результату, используя соответствующие параметры и критерии, которые позволяют оценить, были ли выполнены требования/спецификации к результату для конкретной конструкции;

**Уровень 3.** Требования на уровне технической спецификации исполнения для подрядчика. Подрядчики должны иметь возможность использовать соответствующие технические спецификации, основанные на результате проектирования конструкции с тем, чтобы они могли выбирать и закупать требуемые материалы и/или производимые индустриально системы и изделия у своих поставщиков и использовать соответствующие процессы строительства (возведения) при создании требуемой конструкции/построенного актива/функциональной системы, создание/адаптацию/обновление которой им поручено. Требуемые характеристики должны быть связаны с соответствующими процедурами испытания материалов, изделий, конструкций с тем, чтобы можно было бы подтвердить, что требуемые в проекте технические характеристики были достигнуты с желаемой степенью уверенности/обеспеченности (надежности);

**Уровень 4.** Требования на уровне поставщиков материалов и производителей изделий, конструкций и систем. Поставщикам материалов и производителям изделий и систем необходимы соответствующие спецификации, основанные на параметрах результата, выраженные в технических характеристиках с тем, чтобы они могли предоставлять подходящие материалы, изделия и системы.

Четырехуровневая схема представляет собой систему перекрывающихся требований и спецификаций, основанных на характеристиках поведения/состояния или результатах, фокус которых смещается от широких операционных целей более высокого уровня, согласованных с целями владельца и желаниями пользователей (уровень 1), к более конкретным и узким целям инженерно-технической разработки проекта строительного сооружения (уровень 2), уделяя при этом особое внимание все более подробным аспектам контрактных и технических характеристик (уровни 3 и 4). Упрощенная модель такого подхода показана на рисунке 2. На рисунке 3 представлена общая схема подхода, основанного на требованиях к выходному результату при проектировании новых конструкций с акцентом на «Требованиях» и аспектах «Проверки». При этом отражается разделение общих требований владельца и заинтересованных сторон к показателям устойчивого развития для конструкции на соответствующие технические параметры/характеристики.

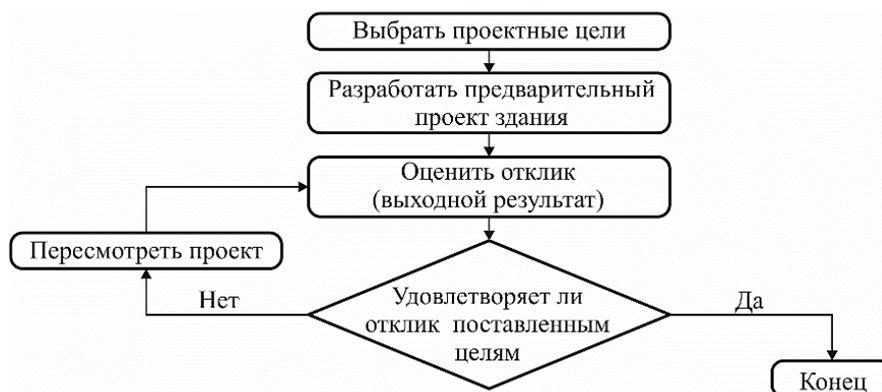
**Структура процедур проектирования нового поколения, основанных на выходном результате.** Процедуры проектирования нового поколения, основанные на отклике, разрабатывают с использованием хорошо апробированной аналитической процедуры оценки рисков, которая включена в программные пакеты для анализа рисков, широко используемые, например, в страховой отрасли и других сферах. Процедуру используют для оценки возможности возникновения прямых убытков (например, затрат на ремонт), человеческих жертв и простоев (времени прерывания эксплуатации) из-за особых воздействий для отдельных зданий и могут применять как к новым, так и к существующим зданиям. Технические детали системы для оценки потерь в зданиях при применении процедуры нового поколения описаны, например, в FEMA 445<sup>4</sup>.

Рассмотрим последовательно выполнение процедуры проектирования в соответствии с новой парадигмой, разделив ее на характерные этапы (рисунок 3).

#### **Этап 1. Выбор проектных целей.**

Процесс начинается с выбора расчетных критериев проектирования, указанных в форме одной или нескольких проектных целей, связанных с откликом/результатами.

<sup>4</sup> FEMA 445. Next Generation Performance-Based Seismic Design Guidelines. – Washington, 2006. – 155 p.

Рисунок 3. – Блок-схема проектирования в соответствии с FEMA 445<sup>5</sup>

Как было показано выше, на уровне 1 заинтересованные стороны должны установить требования к целям (или целевым показателям отклика), которым конструкция или элемент конструкции должны отвечать в течение жизненного цикла, а также к функциям/приемам, критериям состояний, которые обеспечивают достижение этих целей. Цель может быть довольно простой, как, например, обеспечение безопасной эвакуации жильцов/пользователей здания во время пожара или ограничение ущерба и минимизация эксплуатационных и экологических последствий в случае взрыва бытового газа. Эти цели должны быть согласованы всеми заинтересованными сторонами, имеющими отношение к проекту, включая владельца, команду проектировщиков, пользователя, страховую компанию и т.д.

При проверке конструктивной системы в особой расчетной ситуации целью проектирования на основе данного подхода должно быть заявление о приемлемом риске и выявление серьезного уровня ущерба, косвенных убытков, которые могут возникнуть в результате этого ущерба. Следует еще раз подчеркнуть, что при традиционном предписывающем подходе инженер использует правила и положения норм для проектирования и конструирования элементов, а точнее, критических сечений и соединений с тем, чтобы обеспечить конструкционную безопасность без отнесения ее к определенному уровню отклика/повреждения конструктивной системы или ее элемента (проектирование по принципу: «так записано в нормах»).

Для оценивания соответствия отклика проектным целям в рамках новой парадигмы проектирования предложено применять т.н. целевой показатель отклика.

В процедурах проектирования, основанных на результатах, целевой показатель отклика – это заявление о приемлемом риске возникновения несчастных случаев, прямых экономических убытков (расходов на ремонт) и времени простоя, связанного с ремонтом или заменой поврежденных конструктивных и неконструктивных элементов здания, при указанном уровне опасности/особого воздействия. Целевые показатели отклика могут быть сформулированы в трех различных форматах риска.

**Целевой показатель отклика, основанный на интенсивности особого воздействия,** представляет собой количественную оценку приемлемого уровня потерь с учетом установленной интенсивности особого воздействия. Примером целевого значения, основанного на интенсивности, сформулированного заинтересованными сторонами применительно к сейсмическим воздействиям, может быть утверждение о том, что в случае землетрясения со средней интенсивностью, определенной для периода повторяемости 475 лет, стоимость ремонта не должна превышать 20% от восстановительной стоимости здания, не должно быть человеческих жертв или серьезных травм, а перерыв в эксплуатации не должен превышать 30 дней.

**Целевой показатель отклика, основанный на сценарии,** – это количественная оценка допустимого уровня потерь при условии, что будет реализована конкретная угроза. Примером цели, основанной на сценарии, сформулированной заинтересованными сторонами, может быть утверждение, что в случае удара транспортного автодорожного средства весом 160 кН в колонну здания, затраты на ремонт не должны превышать 5% от стоимости восстановления здания, не должно быть человеческих жертв или серьезных травм, а эксплуатация здания не должна прерываться более чем на неделю.

**Целевой показатель отклика, основанный на временном интервале/факторе,** представляет собой количественную оценку допустимой вероятности того, что в течение определенного периода времени будет достигнут или превышен заданный уровень потерь, с учетом перечня всех опасных событий, которые могут повлиять на здание в этот период, и вероятности (частоты) появления каждого из них. Примером цели, основанной на временном факторе, является утверждение, что вероятность того, что в течение 50 лет в здании погибнут люди из-за ущерба, нанесенного особым воздействием, составит менее 2%. В среднем ежегодные затраты на ремонт здания после особого воздействия не должны превышать 1% от стоимости восстановления, а средний период после восстановления и перерыва в эксплуатации, превышающего один день, должен составлять 100 лет.

<sup>5</sup> См. сноску 4.

После того, как цели установлены, для их достижения применяют средства и методы, которые являются специфичными и уникальными для каждого отдельного здания, как это определено в ходе инженерного анализа. Обычно в качестве инструментов, применяемых для демонстрации соответствия, используется сочетание анализа опасностей/рисков и методов компьютерного моделирования для выявления степени повреждений конструктивной системы.

В процессе проектирования, основанного на требованиях к целевым показателям отклика конструктивной системы, явно оценивают, каким образом строительное сооружение может работать в различных условиях, связанных с потенциально опасными событиями. Этот процесс учитывает неопределенности, присущие количественному определению частоты и масштаба потенциальных опасных событий (опасностей/угроз), а также оценке фактической реакции/отклика конструктивной системы при приложении прогнозируемого потенциального воздействия, и влияние установленных неопределенностей поведения системы на функциональность зданий. Определение уровней повреждения конструктивной системы является неотъемлемой частью процесса проектирования и обосновывает проектные решения, которые следует принимать на вариантной основе.

### **Этап 2. Разработка предварительного проекта здания.**

Предварительный проект здания включает в себя определение ряда важных характеристик этого здания, которые могут существенно повлиять на выходные параметры здания. Эти характеристики включают в себя:

- местоположение и характер участка на генплане;
- конструктивное решение здания, включая конфигурацию, количество этажей, высоту этажа, расположение плит перекрытия на каждом этаже и т.д.;
- основная конструктивная система, например, железобетонный или стальной каркас, несущие стены из каменной кладки;
- наличие каких-либо защитных технологий или устройств, например, сейсмоизоляторов, устройств для рассеивания энергии или элементов, устойчивых к повреждениям;
- приблизительные размеры и расположение различных конструктивных и неконструктивных компонентов и систем, а также описание способа их установки и совместной работы.

Выбор подходящей концепции предварительного проектирования важен для эффективной реализации процесса проектирования, ориентированного на выходной результат. Неподходящие концепции предварительного проектирования могут привести к многочисленным итерациям до тех пор, пока не будет найдено приемлемое решение, или к решениям, которые не соответствуют целям.

В настоящее время у инженеров довольно мало ресурсов, на основе которых можно было бы создать предварительный проект для достижения заданной цели. Некоторые могут ссылаться на действующие строительные нормы, другие – на процедуры проектирования, основанные на выходном результате, а третьи могут использовать интуитивный подход.

### **Этап 3. Оценка отклика.**

После разработки предварительного проекта выполняют ряд симуляций (анализов реакции здания на воздействии) для оценки вероятных откликов здания. Оценка результирующих показателей отклика включает следующие действия:

- определение уровня опасности/угрозы;
- анализ конструкции для определения ее вероятной реакции/отклика и эффектов воздействий, передаваемых на поддерживаемые неконструктивные элементы в зависимости от интенсивности воздействия. В случае проверки живучести поврежденной конструктивной системы, численное моделирование следует выполнять с использованием методов нелинейного анализа;
- определение вероятного ущерба, который может быть нанесен конструкции при различных уровнях отклика/реакции конструктивной системы;
- определение вероятного ущерба, который может быть нанесен неконструктивным элементам в зависимости от отклика конструкции и неконструктивных элементов;
- определение потенциальных потерь в результате несчастных случаев, разрушения зданий и потери рабочих мест в зависимости от ущерба, нанесенного конструкции и неконструктивным элементам;
- расчет ожидаемых будущих потерь в зависимости от интенсивности, отклика/реакции конструкции и неконструктивных элементов, а также связанного с этим ущерба.

Оценка отклика основана на предположениях о ряде факторов с высокой степенью неопределенности. К этим факторам относятся:

- качество строительства и состояние здания на момент появления особого воздействия;
- фактическая прочность различных материалов, конструкций и их соединений, использованных в здании;
- характер использования здания на момент появления особой расчетной ситуации, типы усовершенствований, которые могут быть сделаны арендаторами, насколько эти усовершенствования могут быть чувствительны к особому воздействию, а также терпимость арендаторов к работе в менее идеальных условиях;
- наличие проектировщиков и подрядчиков для проведения ремонта после появления особого воздействия;
- эффективность действий владельца при получении необходимой помощи для оценки и устранения повреждений.

Выполнение требований к параметрам отклика устанавливаются с помощью критериев соответствия, участвующих в них ограничений, связанных со сроком службы и целевым уровнем надежности. Требования к результирующим параметрам поведения удовлетворяются, если все соответствующие критерии будут выполнены в течение назначенного срока службы при требуемом уровне надежности.

Критерии соответствия для отклика могут представлять собой сбалансированные количественные или качественные ограничения, определяющие границу между желаемым и неблагоприятным состоянием, актуальным для конкретного аспекта поведения. Критерии оценки соответствия отклика зависят от конкретных потребностей заинтересованных сторон в определенной конструкции.

Процедуры, включенные в нормы *fib Model Code 2020*<sup>6</sup>, характеризуют оценки состояния здания/конструктивной системы на дискретных уровнях, соответствующих конкретным уровням повреждений при действующих нагрузках. В нормах *fib Model Code 2020*<sup>7</sup> эти уровни предельных состояний только качественно описывают степень ущерба, который может получить здание, но не имеют количественного определения с точки зрения их важности для заинтересованных сторон, разделяя их на предельные состояния несущей способности и эксплуатационной пригодности.

Для полной оценки отклика требуются статистические данные о взаимосвязи между опасностью, реакцией здания, ущербом и, следовательно, монетарными потерями (рисунок 4).

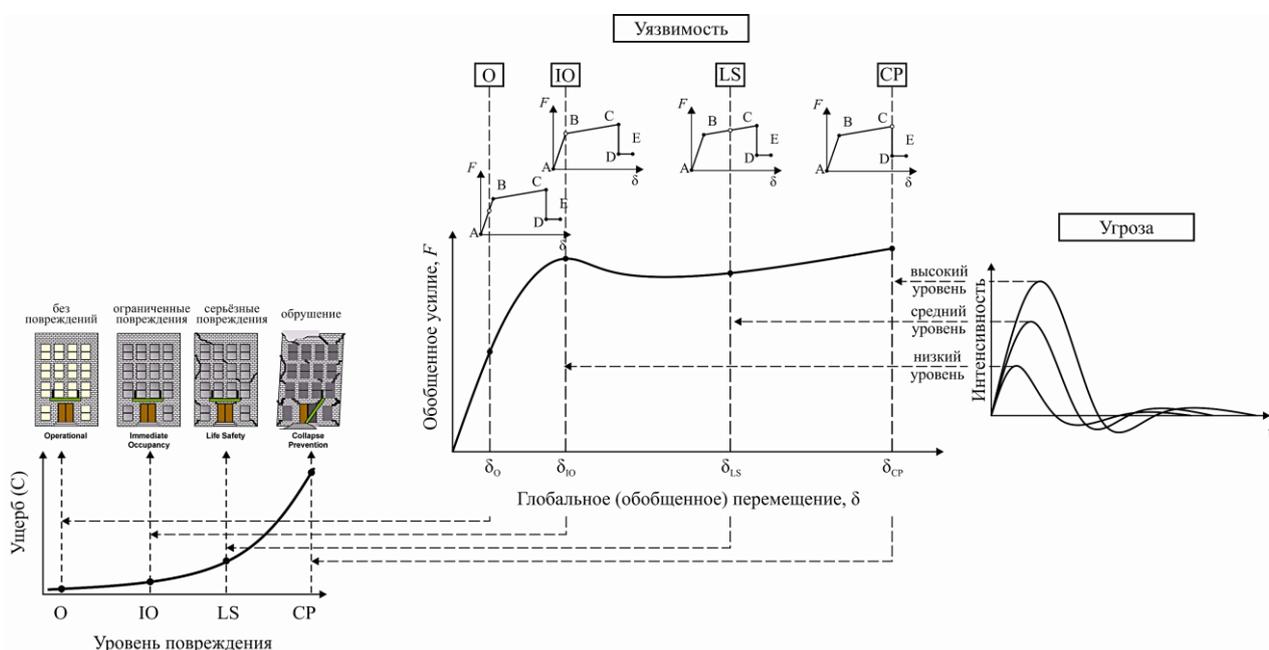


Рисунок 4. – Концепция проектирования конструктивной системы в особой расчетной ситуации на основе триады «угроза-реакция-последствия»

В общем смысле этот процесс включает в себя формирование четырех типов вероятностных функций, которые называются соответственно: функции опасности, функции реакции (откликов) конструктивной системы, функции ущерба/повреждений и функции потерь, а также математические действия с этими функциями для оценки вероятных потерь.

**Функции опасности/угрозы** – это математические выражения вероятности того, что здание подвергнется особому воздействию различной интенсивности; интенсивность может быть выражена в терминах пикового ускорения грунта, спектрального ускорения, давления от взрыва, усилия от удара транспортного средства или аналогичных параметров. При отсутствии обоснованных данных об идентифицированных воздействиях, производят вынужденное удаление поддерживающих элементов, определяя критические случаи нагружения.

**Функции откликов** – это математические выражения условной вероятности возникновения различных уровней отклика здания (различных состояний) при различных уровнях интенсивности особого воздействия или особого сочетания воздействий. Реакция здания выражается в виде вычисляемых параметров, полученных в результате конструктивного анализа, включая смещения этажей, усилия, действующие на элементы, требования к пластическим углам поворота в соединениях и вертикальным перемещениям, ускорения на этажах и аналогичные параметры. Расчетные параметры получают в результате конструктивного анализа здания при различных уровнях интенсивности воздействий в особой расчетной ситуации.

<sup>6</sup> См. сноску 1.

<sup>7</sup> См. сноску 1.

**Функции повреждений** – это математические выражения условной вероятности того, что здание в целом или отдельные конструктивные и неконструктивные элементы будут повреждены на разных уровнях, при условии, что будут наблюдаться разные уровни реакции/отклики здания. Функции повреждений обычно устанавливают с помощью лабораторных испытаний, аналитического моделирования или сочетания этих методов.

**Функции потерь** – это математические выражения условной вероятности возникновения различных потерь, в том числе человеческих жертв, затрат на ремонт и замену, а также перерывов в работе, при условии, что будет нанесен определенный ущерб.

Математические операции с этими функциями могут принимать различные формы. Для некоторых типов оценки отклика можно разработать решения в замкнутой форме, которые позволят напрямую рассчитать потери. Для других типов оценки может потребоваться численное интегрирование или анализ по методу Монте-Карло.

#### **Этап 4. Доработка проекта.**

Если смоделированные показатели отклика соответствуют или превосходят целевые показатели, проект завершен. В противном случае проект необходимо дорабатывать в ходе итеративного процесса до тех пор, пока не будут достигнуты целевые показатели.

Таким образом, предлагаемая методология, представляет собой процедуру проектирования нового поколения, основанную на поведении конструктивной системы, связанной с ее использованием, имеющую следующие усовершенствования по сравнению с процедурами, содержащимися в нормах первого поколения FEMA 445<sup>8</sup>:

– требования к выходным параметрам здания обсуждаются с использованием показателей, которые более удобны и важны для заинтересованных сторон, включая стоимость ремонта, время ремонта, воздействие на окружающую среду, нежелательную рекламу и безопасность жизнедеятельности. Эта информация позволяет заинтересованным сторонам принимать более обоснованные решения в отношении соответствующих параметров отклика здания;

– требования к параметрам поведения конструкции, связанного с ее использованием, выражают, как правило, в вероятностных терминах, с учетом неопределенностей, присущих прогнозированию как характеристик особого воздействия, так и сопротивлений. Показатели состояния конструктивной системы при особых воздействиях представлены функциями многих факторов, практически все из которых являются неопределенными, в том числе: (1) интенсивность особого воздействия; (2) его место приложения и продолжительность; (3) реакция конструктивной системы здания; (4) содержимое/наполнение здания, присутствие людей во время появления угрозы; (5) поведение конструктивной системы здания после реализации угрозы, а также (6) действия, предпринимаемые органами власти, владельцами, специалистами по проектированию и подрядчиками. Заранее точно предсказать поведение здания при появлении предполагаемого особого воздействия практически невозможно. В связи с этим все оценки предлагается выполнять на вероятностной основе.

Требования к параметрам отклика проверяют посредством критериев соответствия поведения конструкции, связанного с ее использованием. Критерии соответствия для отклика могут представлять собой сбалансированные количественные или качественные ограничения, определяющие границу между желаемым и неблагоприятным состоянием, актуальным для конкретного аспекта поведения. Критерии оценки соответствия отклика зависят от конкретных потребностей заинтересованных сторон в определенной конструкции.

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Новая парадигма проектирования, основанного на параметрах поведения строительного сооружения, связанного с его использованием, обеспечивает возможность внедрения концепции оценивания и сравнения рисков в процессе проектирования конструкций/конструктивных систем для информирования заинтересованных сторон о их количественных значениях.

2. Данная концепция проектирования строительного сооружения уже получила признание в сейсмостойком и противопожарном проектировании, где стимулы для ее принятия в качестве альтернативы традиционным предписывающим методам носят, главным образом, ярко выраженный экономический характер.

3. Настоящие исследования направлены на расширение данного подхода применительно к другим видам угроз, в частности связанных с природными явлениями и взрывами, террористическими и криминальными атаками на здания, а также на разработку процедур проектирования, в которых риски, связанные с конкурирующими угрозами, должным образом сбалансированы, а инвестиции в снижение рисков могут быть надлежащим образом направлены и принесут выгоду в процессе безопасной эксплуатации строительного сооружения.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках отдельного проекта научно-исследовательской работы Министерства образования Республики Беларусь «Разработка методики установления допустимых значений мер надежности в критериях живучести поврежденных конструктивных систем из железобетона, применяемых при проверках их устойчивости к прогрессирующему обрушению от чрезвычайных воздействий» (№ гос. регистрации 20231582).

Поступила 30.11.2024

<sup>8</sup> См. сноску 4.

**PERFORMANCE BASED DESIGN METHODOLOGY FOR VERIFICATION THE ROBUSTNESS OF STRUCTURAL SYSTEMS IN ACCIDENTAL DESIGN SITUATIONS. PART 2****A. TUR****(Brest State Technical University)**

*Approaches to the design and/or checking of structural systems in accidental design situation included in prescriptive regulatory and technical documents not only do not have a single/uniform methodological basis, but in some cases establish unrelated verification criteria and safety formats. With regard to checking of structural systems in accidental design situations, the most rational approach to design can be considered based on the response/behavior (performance based design) of a structural system or, in other words, the output result (outcomes-based design), the general provisions of which for the design conditions of RC – structural systems are set out in fib MC 2020. According to this document, performance-based design is an engineering approach to the design of building elements based on agreed design goals and objectives, engineering analysis and quantitative assessment of the compliance of alternatives with the set design goals and objectives using accepted engineering tools, methodologies and criteria for acceptance of the output/outcomes result. The article presents the main provisions of the new paradigm of designing constructive systems based on the output result.*

**Keywords:** *robustness, accidental design situation, performance-based design, response, damage level.*

УДК 628.16

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-58-62

**ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ АЭРАЦИИ ВОДЫ НА УДАЛЕНИЕ МАРГАНЦА ПРИ ОБРАБОТКЕ ВОДЫ СЛОЖНОГО СОСТАВА В НАПОРНЫХ ФИЛЬТРАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ЗАГРУЗКАМИ**

канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО<sup>1)</sup>, Е.С. ВЕЛЮГО<sup>2)</sup>, Т.В. КОЗИЦИН<sup>3)</sup>  
(<sup>1), 2)</sup> Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
<sup>3)</sup> ЧП «АкваПром», Новополоцк)

В статье описывается эффективность удаления из природной воды марганца в зависимости от его исходной концентрации в ней и воздушно-водяного соотношения перед фильтром. Определяется влияние степени аэрации воды на удаление марганца при обработке воды сложного состава в напорных фильтрах с каталитической загрузкой АС, МС и пиролюзитом марки Pyrolox.

**Ключевые слова:** подземные воды, качество воды, аэрационные методы, удаление марганца.

**Введение.** Мониторинг подземных вод Витебской области показывает<sup>1</sup>, что соединения марганца в природной воде практически всегда содержатся вместе с железом, что является гидрогеологической особенностью Республики Беларусь [1]. Как правило, его концентрация составляет 0,11–0,16 мг/дм<sup>3</sup>, однако в осенне-летний период встречаются пиковые превышения марганца до 0,5 мг/дм<sup>3</sup>, реже до 1–1,5 мг/дм<sup>3</sup>.

В большинстве станций (более 95%) Витебской области принятые способы очистки воды, в том числе традиционный метод упрощенной аэрации, со временем снижают концентрацию марганца со значений 0,11–0,16 мг/дм<sup>3</sup> практически до нормативных значений в 0,1 мг/дм<sup>3</sup>. Однако, рассматривая обработку воды сложного состава [2], содержание данного элемента в исходной воде может внести значительные коррективы в подбор технологической схемы обработки воды. Для достижения поставленной цели были выделены и решены следующие задачи:

- а) изучение эффективности удаления из подземной воды марганца в зависимости от его концентрации в природной воде;
- б) влияние степени аэрации воды на удаление марганца при обработке воды сложного состава в напорных фильтрах с каталитической загрузкой АС и МС;
- в) влияние степени аэрации воды на удаление марганца при обработке воды сложного состава в напорных фильтрах с загрузкой из его диоксида.

**Методология исследований.** Для эксперимента по изучению эффективности удаления из природной воды марганца (перевод с двухвалентной в четырехвалентную форму) были подобраны станции в малых населенных пунктах Витебской области с различным содержанием марганца в природной воде:

- объект 1 с исходным содержанием марганца в воде 0,14–0,16 мг/дм<sup>3</sup>;
- объект 2 с исходным содержанием марганца 0,26 мг/дм<sup>3</sup>;
- объект 3 с исходным содержанием марганца 0,53 мг/дм<sup>3</sup>;
- объект 4 с исходным содержанием марганца 1,0 мг/дм<sup>3</sup>.

Следует отметить, что в природной воде данных станций выше нормативных значений содержится не только марганец, но и железо (2,3–5,5 мг/дм<sup>3</sup>), аммиак в виде аммонийного азота (1,5–3,7 мг/дм<sup>3</sup>), перманганатная окисляемость (2,0–6,0 мг/дм<sup>3</sup>), то есть вода имеет сложный состав для ее обработки.

Для эксперимента была использована пилотная установка (собственность частного унитарного производства «АкваПром»), представленная на рисунке 1, состоящая из основной колонны диаметром 250 мм с загрузкой и оборотом для аэрации.

Пилотная установка на разном этапе экспериментов дополнялась фильтрами второй ступени и аэрационными колоннами, а также изменялся материал фильтрующих загрузок фильтров и их соотношение. Использовалась загрузка трех типов: Сорбент АС фракции 0,7–1,4 мм, Сорбент МС фракции 0,7–1,4 мм, пиролюзит марки Pyrolox фракции 0,48–0,53 мм (70–90% MnO<sub>2</sub>). Высота загрузки относительно уровня дренажной системы составила 800 мм.

Отбор проб проводили не менее 2-х часов работы пилотной установки фильтров после их выхода на рабочий режим. Определение концентрации марганца осуществлялось фотометрическим методом с применением окисления соединений марганца до перманганат-ионов после устранения мешающего влияния хлорид-ионов (метод А ГОСТ 4974-2014). По каждому исследуемому параметру анализировали параллельно три образца. Анализ воды осуществлялся в течение 7 часов после отбора в аккредитованной испытательной лаборатории по контролю качества вод УП «Витебскоблводоканал».

Для изменения степени насыщения воды кислородом воздуха на опытной установке применялся компрессор с производительностью до 120 л/мин.

<sup>1</sup> Ежегодные отчеты национальной системы мониторинга подземных вод (за период 2007–2023 гг.) [Электронный ресурс] // Официальный сайт ГИАЦ НСМОС РБ. – URL: <https://www.nsmos.by/environmental-monitoring/monitoring-podzemnykh-vod> (дата обращения 16.07.2024).



1 – основная колонна с загрузкой, диаметром 250 мм; 2 – аэрационный смеситель или колонна; 3 – ресивер компрессора; 4 – подача исходной воды; 5 – подача воздуха; 6 – выпуск воздуха

Рисунок 1. – Установка для проведения эксперимента

**Экспериментальная часть.** Известно, что при работе напорных фильтров с песчаной загрузкой происходит длительное время «зарядки» этой загрузки по марганцу. На это же указывает опыт открытых станций обезжелезивания крупных городов области, где часто идет очень длительная «зарядка» фильтров до 6–8 месяцев. Поэтому исследовательская часть состояла из трех этапов с разными загрузками в фильтрах.

На *первом этапе* экспериментов определялось влияние степени аэрации воды на удаление марганца при обработке подземной воды в напорных фильтрах с каталитической загрузкой АС. Эксперимент был проведен на объекте 1, где присутствуют минимальные концентрации марганца в исходной воде.

Эффективность смешения воды с воздухом оценивалась в двух исполнениях: как самостоятельный элемент (без дополнительных смесительных устройств), так и совместно с аэрационной колонной. Зафиксированные концентрации марганца в фильтрах с загрузкой АС (рисунок 2) практически не снижались, хотя количество кислорода было достаточным для его окисления, учитывая удельную его потребность, которая на окисление железа составляет 0,143, марганца – 0,29, аммония – 3,6 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, было опробовано воздушно-водяное насыщение кислорода воздуха до 5:1.

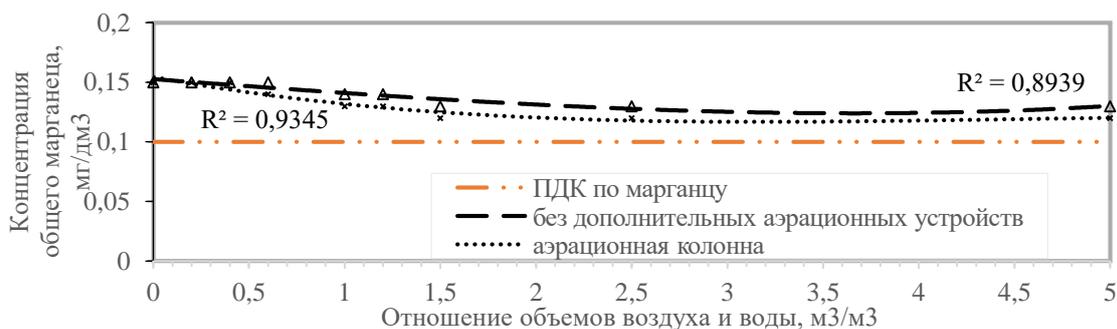


Рисунок 2. – Снижение концентрации марганца в зависимости от отношения воздуха и воды на объекте 1 на фильтрах с загрузкой сорбентом АС

Применение загрузки АС и воздушно-водяного отношения 5:1 не дал положительных результатов. Обычно при увеличении степени аэрации воды происходит отдувка углекислоты и рН воды увеличивается, однако при сложном составе воды уровень рН мало изменяется. Очевидно, здесь на процессы окисления влияют условия образования каталитической пленки для окисления марганца в виде  $Mn^{4+}$ . То есть двухвалентный марганец окисляется значительно медленнее, чем железо, а если  $pH < 8$  и  $Eh < 400$  мВ, то без дополнительных условий этот процесс практически не происходит с образованием  $MnO_2$ . В таких случаях следует предусматривать применение реагентных методов или специализирующей модифицированной загрузки, что послужило предпосылкой для последующих экспериментов.

На втором этапе экспериментов, которые были проведены на объектах 1–3, часть загрузки АС была заменена на загрузку МС в соотношении 75 к 25% и 50 к 50% соответственно. Результаты эксперимента по снижению марганца с применением сорбента АС совместно с МС представлены на рисунках 3 и 4.

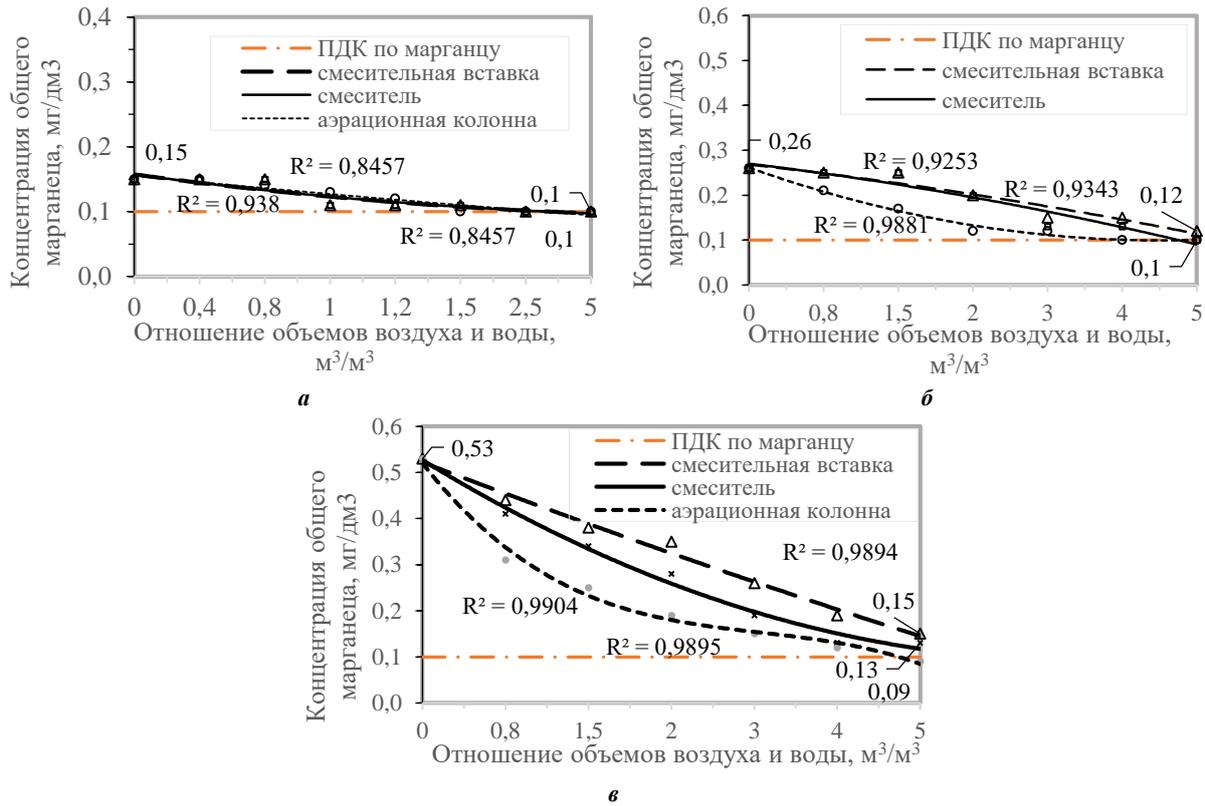


Рисунок 3. – Снижение концентрации общего марганца при аэрации компрессором в зависимости от отношения воздуха и воды в фильтрах с загрузкой сорбента АС и МС в соотношении 75 и 25% на объекте 1 (а), объекте 2 (б) и объекте 3 (в)

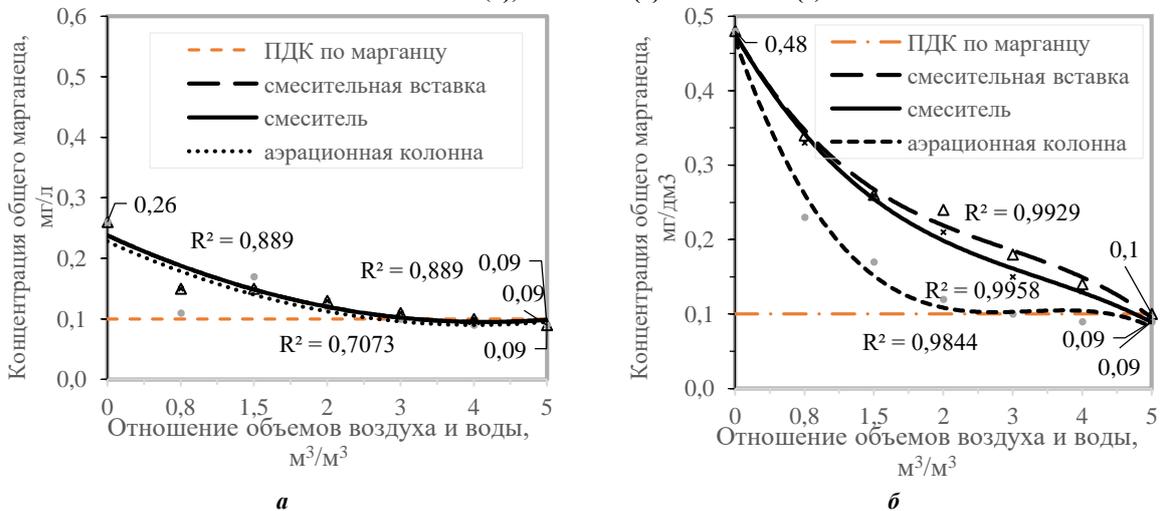


Рисунок 4. – Снижение концентрации общего марганца при аэрации компрессором в зависимости от отношения воздуха и воды в фильтрах с загрузкой сорбента АС и МС в соотношении 50 и 50% на объекте 2 (а), объекте 3 (б) (начало)

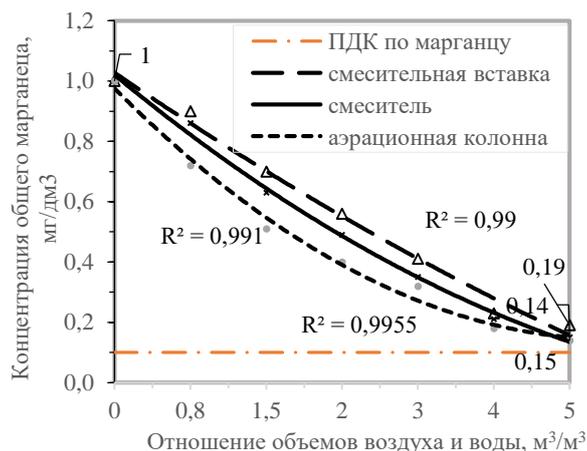


Рисунок 4. – Снижение концентрации общего марганца при аэрации компрессором в зависимости от отношения воздуха и воды в фильтрах с загрузкой сорбента АС и МС в соотношении 50 и 50% на объекте 4 (в) (окончание)

Полученные значения аппроксимируем полиномом второй и третьей степени (см. рисунки 3 и 4). Указанные на графиках коэффициенты детерминации, показывающие, какую долю вариации переменной объясняют полученные уравнения, при этом равны 84–99%, это значит, что наши модели объясняют 84–99% вариаций переменной.

При содержании марганца в природной воде до  $0,15 \text{ мг/дм}^3$  достигается необходимый эффект очистки по марганцу, применяя загрузки сорбентов АС и МС в соотношении 75 и 25%, уже при воздушно-водяном соотношении (2,5–3):1, если концентрация марганца до  $0,3 \text{ мг/дм}^3$  – 5:1 (см. рисунок 3), но более устойчивые значения достигнуты при увеличении до половины содержания в загрузке сорбента МС (рисунок 4). При содержании марганца в природной воде до  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ , применяя загрузки сорбентов АС и МС в соотношении 75 и 25%, не достигают нормативных значений. Однако при большем объеме сорбента МС в фильтре достигается требуемый эффект по марганцу (см. рисунок 4), что не скажешь при содержании марганца в исходной воде в районе  $1 \text{ мг/дм}^3$  (объект 4). Таким образом, необходимо предусматривать другие варианты решения проблемы при содержании марганца в исходной воде около  $1 \text{ мг/дм}^3$ .

На *третьем этапе* экспериментов для увеличения скорости окисления марганца (объект 4) была использована пилотная установка, на которой фильтр первой ступени был загружен сорбентом АС высотой 0,8 м, фильтр второй ступени – сорбентом АС с добавлением пиролюзита в соотношении высот 0,6 м сорбента АС и 0,2 м пиролюзита (рисунок 5). Учитывая разницу в плотностях ( $1,4$  и  $3,8 \text{ т/м}^3$ ), нижний слой был представлен пиролюзитом, верхний – сорбентом АС, бывшим в употреблении (для исключения эффекта свежей загрузки). Поскольку для промывки данных материалов необходима различная скорость (для сорбента АС  $20 \text{ м/с}$ , для пиролюзита  $10 \text{ м/с}$ ), то при промывке фильтра с совмещенным типом загрузки она принимается  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

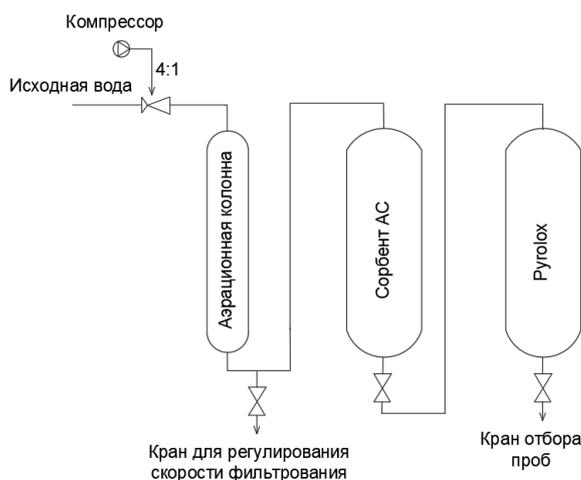


Рисунок 5. – Схема экспериментальной установки

Перед опытом фильтр был промыт обратным током воды в течение 20 минут. Воздушно-водяное соотношение принято равным около 4-х. Скорости фильтрования изменялись в пределах 5,6–9,4 м/с. Продолжительность каждого цикла была не менее 4-х часов.

Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты испытаний по пробному удалению марганца из подземных вод объекта 4

Скорость фильтрования, м/ч	Концентрация общего железа, мг/дм <sup>3</sup>		Концентрация общего марганца, мг/дм <sup>3</sup>
	I ст.	II ст.	
9,4	0,56	0,18	0,14
8,1	0,55	0,15	≤0,10
6,8	0,47	≤0,10	≤0,10
5,6	0,41	≤0,10	≤0,10

Остаточная концентрация кислорода в воде на выходе установки составляла не менее 3-х мг/дм<sup>3</sup>. Применение пиролюзита на второй ступени очистки позволяет снизить содержание железа в воде менее 0,3 мг/дм<sup>3</sup> при любой принятой скорости фильтрования. Концентрация марганца снижается до нормативных значений при скорости фильтрования менее 8 м/ч. Таким образом, при высоком содержании марганца в природной воде увеличение воздушно-водяного соотношения до предельных значений не дает положительных результатов по марганцу, используя обычные загрузки.

**Закключение.** При концентрации марганца в природной воде выше нормы на фильтрах с загрузкой АС не происходит снижение марганца, и не достигается нормативного значения при увеличении воздушно-водяного соотношения, хотя количество кислорода было достаточным для его окисления.

Для воды сложного состава, при высоких сопутствующих концентрациях железа, ион-аммония и окисляемости, достигается снижение марганца до нормативных значений аэрацией компрессором (желательно с устройством аэрационной колонны) с увеличением воздушно-водяного соотношения 5:1 и дальнейшей очисткой на фильтре с совместной загрузкой сорбентов АС и МС в соотношении 75 и 25%, а наиболее устойчивые показатели – 50 и 50%.

Применение сорбента АС высотой 0,8 м на первой ступени и пиролюзита совместно с сорбентом АС с высотой загрузки 0,2 м и 0,6 м соответственно на второй ступени очистки позволяет снизить содержание железа в воде менее 0,3 мг/дм<sup>3</sup> при любой принятой скорости фильтрования. Концентрация марганца снижается до нормативных значений при скорости фильтрования менее 8 м/ч.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Велюго Е.С. Причины загрязнения подземных вод железом с учетом его гидрогеохимических особенностей на территории Республики Беларусь // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2021. – № 8 – С. 21–24.
2. Yushchenko V., Velyugo E., Romanovski V. Development of a new design of deironing granulated filter for joint removal of iron and ammonium nitrogen from underground water / *Environmental Technology*. – 2024. – Vol. 45, iss. 14. – P. 2735–2742. DOI: 10.1080/09593330.2023.2185820.

#### REFERENCES

1. Velyugo, E.S. (2021). Prichiny zagryazneniya podzemnykh vod zhelezom s uchetom ego gidrogeokhimiicheskikh osobennostei na territorii Respubliki Belarus' [The Causes of Underground Water Pollution with Iron in the Territory of the Republic of Belarus Fre Described, Taking into account the Hydrogeochemical Features of this Metal]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F. Civil engineering. Applied Sciences]*, (8), 21–24. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Yushchenko, V., Velyugo, E. & Romanovski, V. (2024). Development of a new design of deironing granulated filter for joint removal of iron and ammonium nitrogen from underground water. *Environmental Technology*, 45(14), 2735–2742. DOI: 10.1080/09593330.2023.2185820.

Поступила 08.12.2024

### INFLUENCE OF THE DEGREE OF WATER AERATION ON THE REMOVAL OF MANGANESE WHEN TREATING WATER OF COMPLEX COMPOSITION IN PRESSURE FILTERS WITH DIFFERENT LOADINGS

V. YUSHCHENKO<sup>1)</sup>, E. VELYUGO<sup>2)</sup>, T. KOZITSIN<sup>3)</sup>  
<sup>1), 2)</sup> *Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,*  
<sup>3)</sup> *PE "AkvaProm", Novopolotsk)*

*The article describes the efficiency of removing manganese from natural water depending on its initial content in it and the air-water ratio before the filter. Determination of the degree of water aeration by removing manganese when treating water of complex composition in pressure filters with catalytic loading AC, MS and Pyrolox pyrolysite.*

**Keywords:** groundwater, water quality, aeration methods, manganese removal.

УДК 691.12

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-63-73

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА СТЕНОВЫХ БЛОКОВ ИЗ ПШЕНИЧНОЙ СОЛОМЫ

**А.Н. ЯГУБКИН, канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ**  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*В статье впервые в Республике Беларусь приводятся результаты исследований химических добавок, влияющих на физико-механические свойства блоков из пшеничной соломы. Предметом исследования являются физико-механические свойства цементной составляющей и стеновых блоков из пшеничной соломы. На основании проведенного эксперимента, выполненного анализа его результатов предложены и запатентованы составы для изготовления конструкционно-теплоизоляционных блоков из пшеничной соломы. Конструкционно-теплоизоляционные блоки на данных составах рекомендуется применять при кладке стен одно- и двухэтажных зданий. Результаты исследования могут использоваться для подбора составов при производстве строительных материалов и изделий из растительного сырья, в учебном процессе строительных специальностей ВУЗов.*

**Ключевые слова:** растительное сырье, пшеничная солома, химическая добавка, сроки схватывания цементного теста, нормальная густота цементного теста, давление формования, стеновой материал, средняя плотность, коэффициент теплопроводности, прочность при сжатии.

**Введение.** Применение растительного сырья для производства строительных материалов и изделий известно давно. Один из первых патентов машины для прессования растительного сырья, встречающихся в патентной базе США, относится к 1841 году<sup>1</sup>. В 1856 году запатентована машина для производства кирпича, которая могла прессовать глину с соломой, гравием, камнями<sup>2</sup>. Материалы и изделия из соломы не утратили своей актуальности сегодня. Так, в северном Китае существует государственная программа строительства жилых домов из соломы [1]. Хорошие результаты по устойчивости показывают соломенные дома в сейсмоопасных районах Казахстана [2]. Научные исследования этих материалов проводятся в Республике Беларусь, Российской Федерации, Португалии, Венгрии, Бразилии [3–8].

Основными недостатками строительных материалов и изделий из прессованной соломы являются низкая атмосферостойкость и недолговечность. Устранить приведенные выше недостатки возможно с помощью цементного вяжущего. Однако при производстве необходимо снизить негативное влияние растительного сырья на процессы набора прочности цементным вяжущим. Большинство авторов отмечает, что на прочность материала отрицательно влияют вещества, содержащиеся в растительном сырье: гемицеллюлоза, крахмал и экстрактивные вещества (сахароза, глюкоза, фруктоза, таниды, органические кислоты, минеральные соли) [3; 7; 8].

Рассмотрим особенности формирования структуры строительного материала на основе растительного сырья по сравнению с обычными бетонами.

Первая особенность – достаточно высокое водоцементное отношение (0,8–1,1). Это связано с тем, что органическое сырье гигроскопично. Более половины воды затвердения впитывается стенками клеток, насыщает волокна, заполняет поры и капилляры [9–12]. Насыщение растительного материала водой происходит в течение нескольких часов. Одновременно происходят процессы гидратации в цементном тесте. Наступает момент, когда цементу становится недостаточно воды затвердения. Поэтому цемент начинает вытягивать воду из органического материала. Однако находясь в стенках клеток, волокнах, порах и капиллярах, вода вымывает из них экстрактивные вещества. Данные соединения, попадая в цемент до начала схватывания, замедляют процессы набора прочности (сроки схватывания увеличиваются до 3–4 суток, набор прочности – до 3–4 месяцев), ухудшают сцепление цементного камня с растительным материалом, т.к. создают пленки на поверхности алита, алюминатов и изолируют частицы цемента от воды [9–13]. Интенсивность поступления вместе с водой экстрактивных веществ снижается к моменту начала схватывания и останавливается к концу схватывания цемента. Большинство исследователей считает, что основным самым эффективным способом нейтрализации экстрактивных веществ является использование химических добавок [10–13]. Если за счет введения химической добавки ускорить процессы схватывания и твердения цемента, то экстрактивные вещества не смогут существенно повлиять на набор прочности цементного камня [12–14]. Для этих целей применяют ускорители твердения и добавки-пластификаторы, которые ускоряют твердение за счет снижения водоцементного отношения [10–16].

Вторая особенность – прессование смеси при формовке и выдержка в форме для предотвращения разуплотнения материала. Для этого необходимо подобрать величину пригруза, обеспечивающего получение нужной плотности, а также использовать формы с фиксирующими крышками. В этом случае также важны сроки схватывания и скорость набора прочности, а значит необходимо и использование химических добавок.

Исходя из вышесказанного, выбор вида, расхода химической добавки и определение ее влияния на свойства цементной составляющей в стеновых блоках из пшеничной соломы, а также подбор величины пригруза для формирования прочной структуры строительного материала являются актуальными задачами.

<sup>1</sup> US 0002026 A 1841. – Mode of access: <http://surl.li/orkdte>. – Date of access: 19.11.2024.

<sup>2</sup> US 0015329 A 1856. – Mode of access: <http://surl.li/evrlnw>. – Date of access: 19.11.2024.

В статье впервые в Республике Беларусь приводятся результаты исследований химических добавок, влияющих на физико-механические свойства стеновых блоков из пшеничной соломы<sup>3,4</sup>.

Объект исследования – стеновые блоки из пшеничной соломы. Предмет исследования – физико-механические свойства стеновых блоков из пшеничной соломы.

Практическая значимость – результаты исследования могут использоваться для подбора составов при производстве строительных материалов и изделий из растительного сырья, в учебном процессе строительных специальностей ВУЗов.

**Материалы и методы исследований.** Для выполнения исследований использовали портландцемент марки 42,5Н ГОСТ 30108-2020, ПЦ500Д0 (производства ОАО «Белорусский цементный завод», г. Костюковичи, Республика Беларусь). Применяли следующие химические добавки: гиперпластификатор «Frem S-SB» на основе поликарбоксилата, суперпластификатор «Frem C-3 В» (производства ЗАО «Завод добавок и смазок «ФРЭЙМ», Республика Беларусь); ускоритель твердения – сульфат алюминия (производства ООО «Ксант-Инвест», Республика Беларусь); а также комплексную добавку, содержащую суперпластификатор «Frem C-3 В» и ускоритель твердения – сульфат алюминия. В качестве растительного структурообразующего материала исследовали резанную пшеничную солому (д. Черноручье-1, Республика Беларусь) в форме трубок различной фракции длиной от 10 до 50 мм, которую получали на барабанной соломорезке типа РСБ 0,1 (Российская Федерация). Цементное тесто и бетонную смесь затворяли водопроводной водой по СТБ 1114<sup>5</sup>.

Для подбора расхода химических добавок определяли нормальную густоту, сроки схватывания цементного теста по ГОСТ 310.3<sup>6</sup> и прочность на сжатие цементного камня (ГОСТ 10180<sup>7</sup>). Для взвешивания химических добавок использовались весы лабораторные марки ВК-300 (Российская Федерация), для цемента и воды применялись весы лабораторные марки ВК-600 (Российская Федерация). Образец-кубик с размером ребра 20 мм изготавливали в формах 6ФК-20 ГОСТ 22685<sup>8</sup>. У цементного теста без добавок показатель нормальной густоты (НГЦТ) составил 32,5%, время начала схватывания равнялось 270 минут, конец схватывания наступил через 330 минут. Размеры образцов для расчета средней плотности и прочности на сжатие измеряли штангенциркулем цифровым ШЦЦ-I (Российская Федерация). Массу образцов для расчета средней плотности определяли на весах ВК-300. Значения прочности при сжатии образцов-кубиков получали на гидравлическом прессе ПГМ-500 МГ4А (Российская Федерация).

Для взвешивания химических добавок, цемента, воды, соломы при изготовлении бетонных образцов использовали весы марки МТ 15 В1ЖА (Российская Федерация). Давление формования во время подбора расхода структурообразующего материала и изготовления бетонных образцов-кубов с размером ребра 150 мм измеряли гидравлическим прессом П-125 (Российская Федерация) и ПГМ-500 МГ4А.

Размеры бетонных образцов для расчета средней плотности, коэффициента теплопроводности и прочности на сжатие измеряли штангенциркулем цифровым ШЦЦ-I. Массу бетонных образцов для расчета средней плотности, коэффициента теплопроводности определяли на МТ 15 В1ЖА.

Прочность при сжатии бетонных образцов исследовали на образцах-кубах с размером ребра 150 мм (ГОСТ 10180<sup>9</sup>) гидравлическим прессом ПГМ-500 МГ4А. Среднюю плотность образцов-кубов определяли по ГОСТ 12730.1<sup>10</sup>. Коэффициент теплопроводности изучали прибором ИТП-МГ4 «250» (Российская Федерация) в соответствии с СТБ 1618<sup>11</sup>. Для этого предварительно образцы размером 250×250×40 мм высушивались до постоянной массы в сушильном шкафу SNOI 60/300 (Литва).

**Ограничения исследования.** Погрешности приборов: весы ВК-300 – ±0,015 г, весы ВК-600 – ±0,1 г, весы МТ 15 В1ЖА – ±2 г, штангенциркуль цифровой ШЦЦ-I – ±0,03 мм, гидравлический пресс П-125 – ±2%, гидравлический пресс ПГМ-500 МГ4А – ±1%, прибор для определения теплопроводности ИТП-МГ4 «250» – ±5%, стабильность температуры в установившемся тепловом режиме для сушильного шкафа SNOI 60/300 – ±1 °С. Статистические показатели: при испытаниях образцов из цементного камня коэффициент вариации – 10% (средняя плотность и прочность на сжатие); при испытаниях образцов из бетона коэффициент вариации – 10% (средняя плотность); коэффициент вариации – 15% (прочность на сжатие).

<sup>3</sup> ТУ ВУ 300220696.063-2023. Блоки строительные конструкционно-теплоизоляционные на растительном заполнителе. Технические условия. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2023. – 11 с.

<sup>4</sup> Евразийский патент № 047578. Строительный конструкционно-теплоизоляционный материал: опубл. 08.08.2024. – М.: Евраз. патент. орг., 2024. – 3 с.

<sup>5</sup> СТБ 1114-98. Вода для бетонов и растворов. Технические условия. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь; Стройтехнорм, 1998. – 20 с.

<sup>6</sup> ГОСТ 310.3-76. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема. – М.: Стройиздат; М-во пром-сти строит. материалов СССР, 1977. – 9 с.

<sup>7</sup> ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: НИИЖБ, 2012. – 36 с.

<sup>8</sup> ГОСТ 22685-89. Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия. – Введ. 01.01.1990. – М.: Стройиздат; М-во пром. строит. материалов СССР, 1990. – 11 с.

<sup>9</sup> См. сноску 7.

<sup>10</sup> ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности. – М.: Изд-во стандартов СССР, 1980. – 5 с.

<sup>11</sup> СТБ 1618-2006. Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь; Стройтехнорм, 2006. – 12 с.

**Основная часть.** Целью исследований являлось определение влияния химических добавок на физико-механические свойства конструкционно-теплоизоляционного материала из пшеничной соломы, подбор составов и величины давления формования для изготовления стеновых блоков.

На первом этапе определяли влияние химических добавок на схватывание цементного теста нормальной густоты и прочность цементного камня. Граничные значения расходов добавок приняты на основании требований ГОСТ 30459<sup>12</sup> и рекомендаций производителей. Расходы комплексной добавки приняты на основании исследований [17–19].

Основная цель введения химических добавок – снизить влияние растительного сырья на сроки схватывания и твердения цемента, ускорить набор прочности для максимально быстрой распалубки образцов. В качестве критерия эффективности химических добавок по СТБ 1112 принимался критерий: повышение прочности бетона на 20% и более в возрасте 1 суток нормального твердения и на 30% и более в возрасте 2 суток<sup>13</sup>.

Составы для изготовления образцов на цементном тесте приведены в таблице 1. Влияние расхода химических добавок на схватывание цементного теста приведено в таблице 2 и на рисунке 1. Влияние расхода химических добавок на прочность цементного камня показано в таблице 3 и на рисунке 2.

Таблица 1. – Составы цементного теста с химическими добавками

Шифр состава	Расход цемента, г	Расход воды, мл	Вид химической добавки	Расход добавки, % от массы цемента
1.1	400	130	-	-
1.2	400	111	Frem S-SB	1,1
1.3	400	104	Frem S-SB	1,3
1.4	400	98	Frem S-SB	1,5
1.5	400	130	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	2,0
1.6	400	130	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	3,0
1.7	400	130	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	4,0
1.8	400	112	Frem C-3 B	0,5
1.9	400	104	Frem C-3 B	0,7
1.10	400	104	Frem C-3 B	1,0
1.11	400	111	Frem C-3 B, Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,7 0,3
1.12	400	100	Frem C-3 B, Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,7 0,5
1.13	400	99	Frem C-3 B, Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,7 0,7

Таблица 2. – Влияние расхода химических добавок на схватывание цементного теста

Шифр состава	НГЦТ, %	Сроки схватывания цементного теста		Снижение времени схватывания относительно бездобавочного состава	
		Начало схватывания, мин	Конец схватывания, мин	Начало схватывания, %	Конец схватывания, %
1.1	32,5	270	330	-	-
1.2	27,6	40	240	85,2	27,3
1.3	26,1	30	210	88,9	36,4
1.4	24,4	20	180	92,6	45,5
1.5	32,5	50	190	81,5	42,4
1.6	32,5	40	180	85,2	45,5
1.7	32,5	30	60	88,9	81,9
1.8	28,0	50	290	81,5	12,1
1.9	26,0	40	250	85,2	24,2
1.10	26,0	40	250	85,2	24,2
1.11	27,6	40	245	85,2	25,8
1.12	25,0	20	180	92,6	45,5
1.13	24,8	20	180	92,6	45,5

<sup>12</sup> ГОСТ 30459-96. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь; НИИЖБ РФ, 1998. – 40 с.

<sup>13</sup> СТБ 1112-98. Добавки для бетонов. Общие технические условия. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь; Стройтехнорм, 1999. – 23 с.

Таблица 3. – Влияние расхода химических добавок на прочность цементного камня

Шифр состава	Прочность на сжатие, МПа		Прирост прочности относительно бездобавочного состава, %		Выполнение критерия эффективности ускорителя твердения <sup>14</sup>	
	1 сутки	2 сутки	1 сутки	2 сутки	1 сутки	2 сутки
1.1	2,30	7,00	-	-	-	-
1.2	2,35	7,25	2,2	3,6	Нет	Нет
1.3	2,51	8,11	9,1	15,9	Нет	Нет
1.4	3,25	9,12	41,3	30,3	Да	Да
1.5	2,31	7,12	0,4	1,7	Нет	Нет
1.6	2,85	8,25	23,9	17,9	Да	Нет
1.7	1,00	4,25	-56,5	-39,3	Нет	Нет
1.8	2,41	7,45	4,7	6,4	Нет	Нет
1.9	2,60	7,47	13,0	6,4	Нет	Нет
1.10	2,69	7,50	17,0	7,1	Нет	Нет
1.11	2,61	7,65	13,5	9,3	Нет	Нет
1.12	3,19	9,10	38,7	30,0	Да	Да
1.13	3,21	9,11	39,6	30,1	Да	Да

*Примечание.* Сравнение изменения средних величин прочности на сжатие для составов 1.12 и 1.13 показывает, что изменение статистически не значимо [20] (число степеней свободы  $f=6$ , уровень значимости  $p=0,05$ , двусторонний критерий  $t_{0,975}=2,23$ , для испытаний через одни сутки ошибка воспроизводимости  $s=0,31$ , нулевая гипотеза принимается  $0,02 < 0,40$ ; через двое суток  $s=0,34$ , нулевая гипотеза принимается  $0,01 < 0,44$ ).

Как видно из таблицы 3, критерию эффективности соответствуют гиперпластификатор «Frem S-SB» (состав 1.4) и комплексная добавка суперпластификатора и ускорителя твердения (состав 1.12, 1.13).

Прочность цементного камня при введении гиперпластификатора с ускоряющим эффектом в количестве 1,1% от массы цемента (состав 1.2) практически не изменяется по сравнению с бездобавочным составом 1.1 (в первые сутки твердения увеличивается на 2,2%, во вторые – на 3,6%). Время начала схватывания при этом снижается на 85,2%, конца схватывания – на 27,3%. Концентрация добавки 1,3% (состав 1.3) приводит к росту прочности в 1 сутки на 9,1%, во вторые – на 15,9%. Сроки схватывания сокращаются на 88,9% и 36,4% соответственно. При введении добавки в количестве 1,5% (состав 1.4) в 1 сутки твердения прочность повышается на 41,3%, во 2 сутки – на 30,3%. Начало схватывания уменьшается на 92,6%, конец схватывания – на 45,5%.

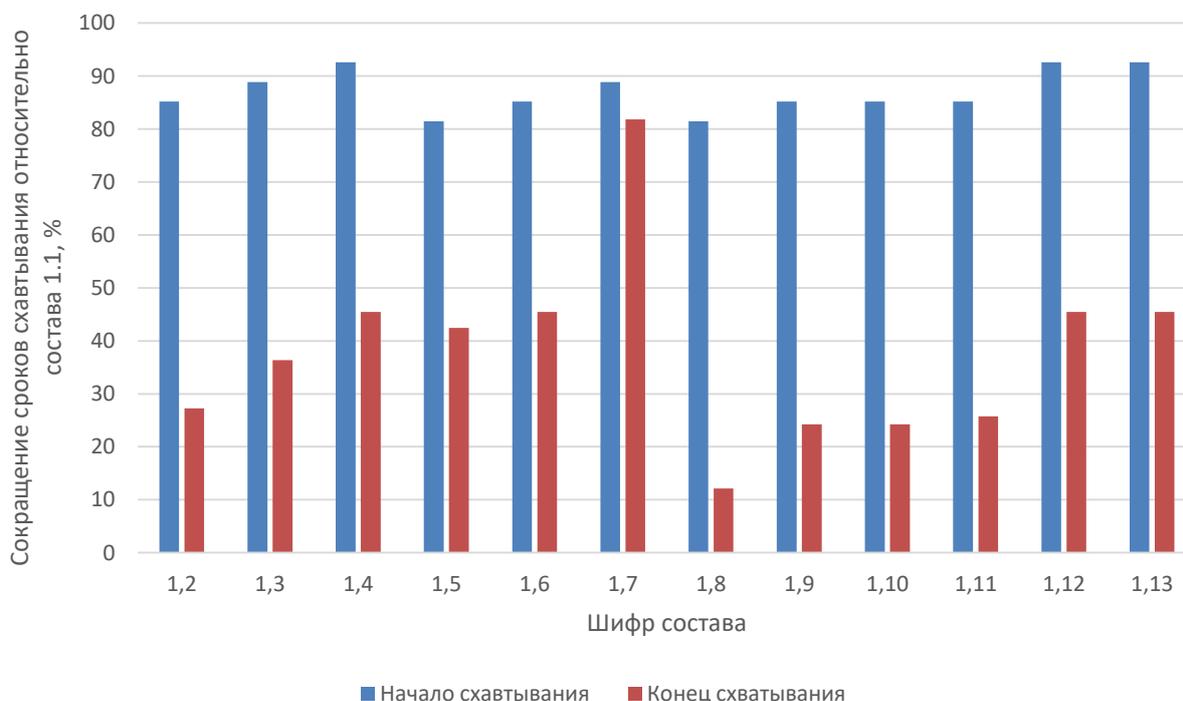


Рисунок 1. – Изменение сроков схватывания относительно бездобавочного состава

<sup>14</sup> См. сноску 13.

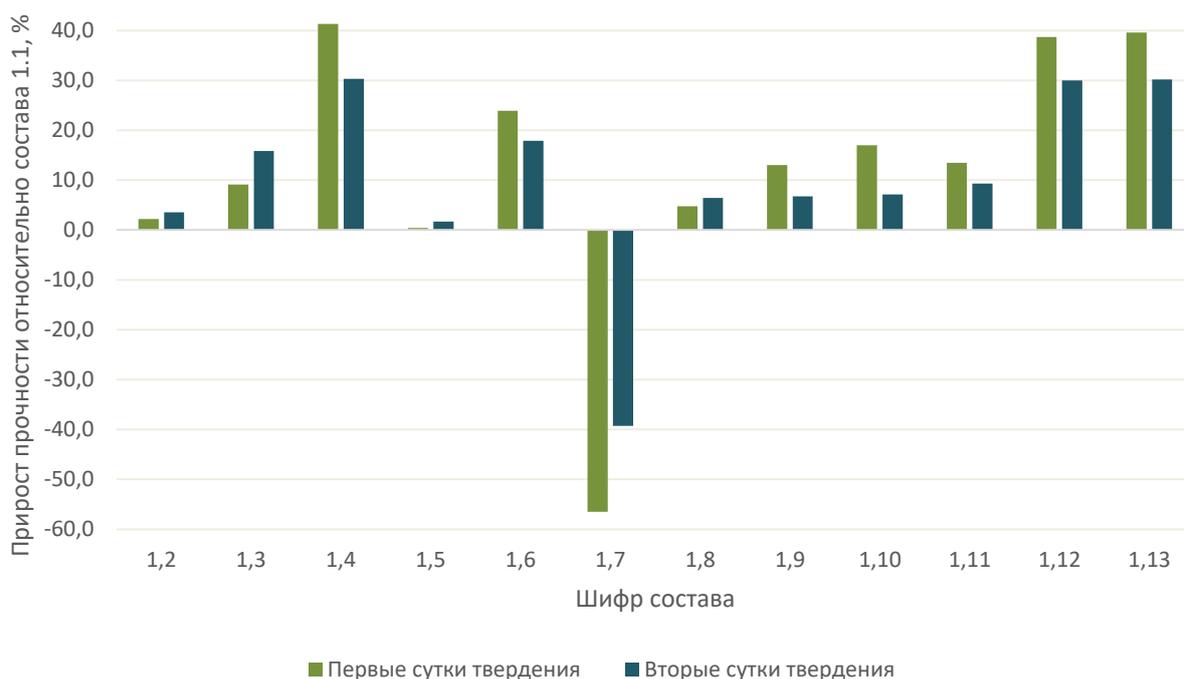


Рисунок 2. – Прирост прочности на сжатие относительно бездобавочного состава

Применение ускорителя твердения – сернокислого алюминия при дозировке 2% от массы цемента (состав 1.5) не выявило увеличения прочности за 1 сутки твердения (прирост 0,4%), за вторые сутки твердения – прирост 1,7%. Сроки схватывания снизились на 81,5% и 42,4% соответственно. Дозировка добавки 3% (состав 1.6) позволяет увеличить прочность в 1 сутки твердения на 23,9%, во 2 сутки – на 17,9%. Начало схватывания снижается на 85,2%, конец схватывания – на 45,5%. При дозировке 4% от массы цемента (состав 1.7) наблюдается значительное снижение прочности в 1 и 2 сутки твердения – на 56,5% и 39,3% соответственно. Также наблюдается значительное уменьшение времени конца схватывания – на 81,9%, начало схватывания сократилось на 88,9%.

При введении 0,5% от массы цемента суперпластификатора «Frem C-3 В» (состав 1.8) за 1 и 2 сутки твердения прочность повышается незначительно (на 4,7% и 6,4% соответственно). Начало схватывания понижается на 81,5%, конец схватывания – на 12,1%. Для состава 1.9 с расходом суперпластификатора 0,7% прочность в 1 сутки твердения увеличивается на 13% по сравнению с бездобавочным составом, а во 2 сутки твердения остается на уровне состава 1.8 с расходом добавки 0,5%. Начало схватывания уменьшается на 85,2%, конец схватывания – на 24,2%. Дозировка 1% (состав 1.10) позволяет поднять прочность в 1 сутки на 17%, а после 2 суток – на 7,1%. Сроки схватывания не изменяются по сравнению с составом 1.9 (расход добавки 0,7%).

Показатели прочности для состава 1.13 статистически незначительно отличаются от показателей состава 1.12 (см. примечание к таблице 3), при этом состав 1.13 имеет больший расход ускорителя твердения.

Комплексная добавка (состав 1.11) увеличивает прочность в 1 сутки твердения на 13,5%, во 2 сутки – на 9,3%. Начало схватывания снижается на 85,2%, конец схватывания – на 25,8%. Для состава 1.12 увеличение прочности на сжатие составило 38,7% в первые сутки твердения и 30% во вторые сутки твердения по сравнению с бездобавочным составом. Сроки схватывания сокращаются на 92,6% и 45,5% соответственно. Для состава 1.13 прочность в 1 сутки повышается на 39,6%, во 2 сутки – на 30,1%. Сроки схватывания не изменяются по сравнению с составом 1.12.

На основании результатов проведенного эксперимента (см. таблицы 2, 3, рисунки 1, 2) и выполненного анализа его результатов в дальнейших исследованиях использовали добавку гиперпластификатора с ускоряющим эффектом в количестве 1,5% от массы цемента и комплексную добавку суперпластификатора и ускорителя твердения в количестве 0,7 и 0,5% от массы цемента соответственно (см. составы 1.4 и 1.12, таблица 1).

На втором этапе общий расход растительного структурообразующего материала принимали на основании проведенных экспериментов. Для этого одну из вертикальных граней формы размером 200×150×150 мм (высота×длина×ширина) заменяли оргстеклом толщиной 10 мм. Затем в форму загружали резанную фракционированную пшеничную солому (рисунок 3, а). Соотношение фракций определялось экспериментальным путем и соответствовало 50/50 [4]. Далее гидравлическим прессом П-125 осуществляли сжатие образца до размера вертикального ребра формы 150 мм (рисунок 3, б). Расход пшеничной соломы и давление формования подбирали таким образом, чтобы в производстве использовать гидравлический домкрат 1,5–2 т (при этом расход пшеничной соломы составил 180–225 кг на 1 м<sup>3</sup> соответственно).



*a* – форма с соломой до испытаний; *б* – форма с соломой при фиксировании крышки на расстоянии 150 мм от нижней грани  
**Рисунок 3. – Определение расхода структурообразующего материала**

Расход цемента принимался на основании данных из литературных источников [9–16, 17–19]. Водоцементное отношение подбиралось экспериментальным путем.

На третьем этапе изготавливали образцы-кубы с размером ребра 150 мм при различных расходах компонентов и определяли следующие характеристики: среднюю плотность, коэффициент теплопроводности, прочность на сжатие, давление формования, время выдержки образца в форме. Расход основных компонентов приведен в таблице 4. Результаты исследований приведены в таблице 5 и на рисунках 4, 5.

Таблица 4. – Составы образцов

Шифр состава	Расход цемента, кг на 1 м <sup>3</sup>	Расход воды, кг на 1 м <sup>3</sup>	Расход соломы, кг на 1 м <sup>3</sup>	В/Ц	Вид добавки	Расход добавки, % от массы цемента
1.15	400	280	180	0,7	Frem S-SB	1,5
1.16	500	350	180	0,7	Frem S-SB	1,5
1.17	500	300	180	0,6	Frem S-SB	1,5
1.18	500	300	180	0,6	Frem C-3 B, Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,7 0,5
1.19	500	250	180	0,5	Frem S-SB	1,5
1.20	500	300	180	0,6	Frem S-SB	1,5
1.21	500	300	180	0,6	Frem C-3 B, Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,7 0,5
1.22	625	375	225	0,6	Frem S-SB	1,5
1.23	625	375	225	0,6	Frem S-SB	1,5
1.24	625	375	225	0,6	Frem C-3 B, Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,7 0,5

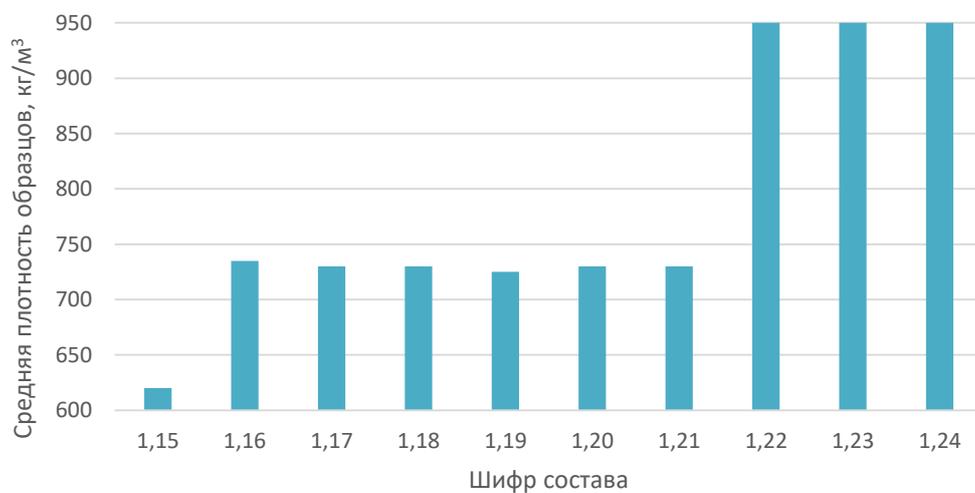
Таблица 5. – Основные физико-механические характеристики образцов

Шифр состава	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности в абсолютно сухом состоянии, Вт/(м·°C)	Прочность на сжатие, МПа	Давление формования, МПа	Время выдержки образца в форме, ч	Состояние образца
1.15	620	0,081	1,0	0,8	48	Разуплотненная слабо связная структура, шелушение (см. рисунок 4, <i>a</i> )
1.16	735	0,091	1,1	1,2	48	Сформированная связная структура
1.17	730	0,089	1,5	1,2	48	Сформированная связная структура (см. рисунок 4, <i>б</i> )
1.18	730	0,089	1,2	1,2	48	Сформированная связная структура
1.19	725	0,089	1,0	1,2	48	Разуплотненная слабо связная, шелушение
1.20	730	0,089	1,0	1,2	24	Разрывы
1.21	730	0,089	1,0	1,2	24	Разуплотненная структура, разрывы (см. рисунок 4, <i>в</i> )
1.22	950	0,11	1,8	1,5	48	Разрывы
1.23	950	0,11	2,1	1,5	72	Сформированная связная структура (см. рисунок 4, <i>г</i> )
1.24	950	0,11	1,8	1,5	72	Сформированная связная структура



*a* – разуплотненная структура (состав 1.15); *б* – сформированная, связная структура (состав 1.17); *в* – разуплотненная структура (состав 1.21); *г* – сформированная, связная структура (состав 1.23)

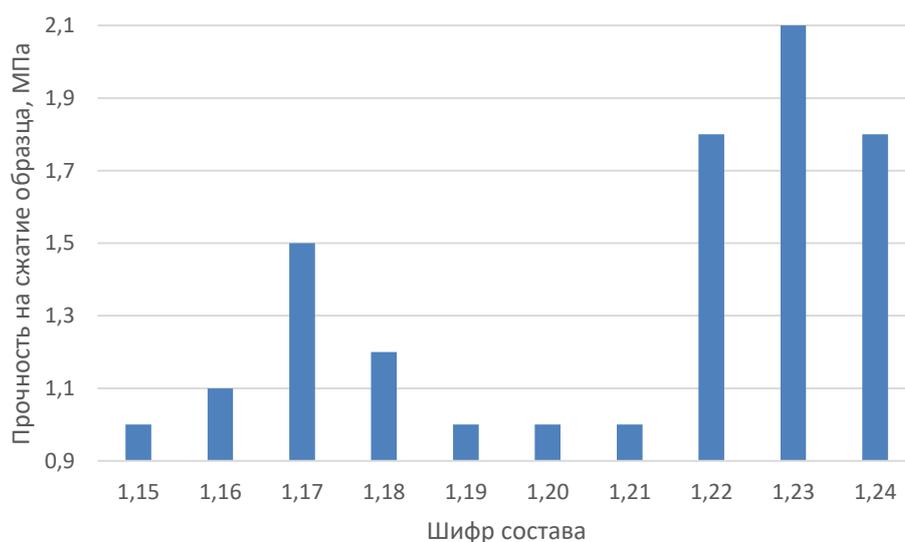
Рисунок 4. – Внешний вид образцов-кубов



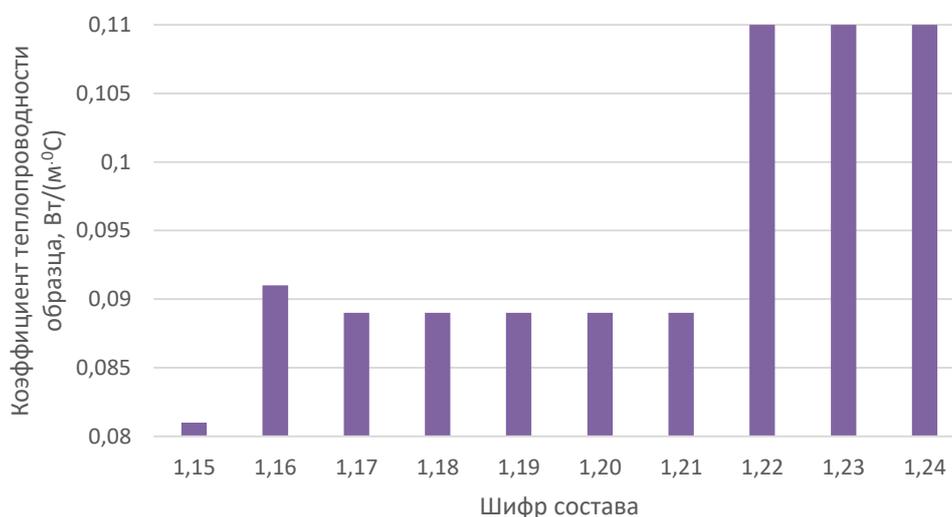
*a*

*a* – средняя плотность образцов

Рисунок 5. – Влияние химических добавок на основные свойства образцов (начало)



б



в

б – прочность на сжатие образцов; в – коэффициент теплопроводности образцов

Рисунок 5. – Влияние химических добавок на основные свойства образцов (окончание)

Образцы состава 1.15 при средней плотности  $620 \text{ кг/м}^3$  показали коэффициент теплопроводности  $0,081 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ , прочность на сжатие  $1 \text{ МПа}$ , давление формования  $0,8 \text{ МПа}$ , время выдержки образца в форме  $48 \text{ ч}$ . Разуплотненная, слабо связанная структура и шелушение для этого состава объясняется недостаточным расходом цемента (см. рисунок 4, а).

Сформированная связанная структура образцов-кубов (см. составы 1.16–1.18, рисунок 4, б) обеспечена достаточным расходом цемента и выдержкой в форме в течение 48 часов. При этом состав 1.17 с добавкой гиперпластификатора ( $\text{В/Ц}=0,6$ ) имеет прочность на  $26\%$  выше, чем аналогичный состав 1.16 с  $\text{В/Ц}=0,7$ . Образец (состав 1.18) с комплексной добавкой при  $\text{В/Ц}=0,6$  имеет прочность на  $20\%$  ниже, чем аналогичный состав 1.17 с гиперпластификатором. Коэффициенты теплопроводности для составов 1.17–1.18 на  $10\%$  выше, чем для состава 1.15. Давление формования повышается с  $0,8 \text{ МПа}$  (состав 1.15) до  $1,2 \text{ МПа}$ .

При снижении  $\text{В/Ц}$  с  $0,6$  (состав 1.17) до  $0,5$  происходит формирование слабо связанной структуры и наблюдается шелушение поверхности образцов (состав 1.19), что свидетельствует о недостаточном количестве воды затворения.

При сокращении выдержки в форме с  $48$  до  $24$  часов (составы 1.20–1.21) появляются горизонтальные разрывы в структуре образцов, что связано с саморазуплотнением структурообразующего материала (солемы) при низкой прочности цементного камня в первые сутки (см. рисунок 4, в). Результаты свидетельствуют о том, что  $24$  часа недостаточно для выдерживания образца в форме (для такого расхода компонентов и средней плотности материала).

Возрастание плотности кубов с 730 до 950 кг/м<sup>3</sup> (состав 1.22) при выдержке в форме 48 часов также приводит к появлению разрывов в структуре образцов. Как показали исследования, при выдержке в форме 72 часа получаем образцы, обеспечивающие сформированную, связную структуру (см. составы 1.23–1.24, рисунок 4, з). Образцы состава 1.23 с добавкой гиперпластификатора при средней плотности 950 кг/м<sup>3</sup> показали коэффициент теплопроводности 0,11 Вт/(м·°С), прочность на сжатие 2,1 МПа, давление формования 1,5 МПа. У образцов состава 1.24 с комплексной добавкой по сравнению с образцами состава 1.23 средняя плотность, коэффициент теплопроводности, давление формования не изменяются, а прочность на сжатие уменьшается на 15%.

**Заключение.** В статье с учетом особенностей формирования структуры строительного материала на основе растительного сырья по сравнению с обычными бетонами произведен выбор вида, расхода химических добавок и определение их влияния на физико-механические свойства конструкционно-теплоизоляционного материала из пшеничной соломы, подбор составов и величины давления формования для изготовления стеновых блоков.

На основании проведенного эксперимента и выполненного анализа его результатов для изготовления конструкционно-теплоизоляционных блоков приняты следующие расходы химических добавок: расход гиперпластификатора с ускоряющим эффектом – 1,5% от массы цемента, расход комплексной добавки суперпластификатора и ускорителя твердения – 0,7 и 0,5% от массы цемента соответственно.

Состав 1.17 с добавкой гиперпластификатора в количестве 1,5% от массы цемента при плотности 730 кг/м<sup>3</sup> показывает коэффициент теплопроводности 0,089 Вт/(м·°С), прочность на сжатие равна 1,5 МПа. Время выдержки в форме 48 часов. Давление формования 1,2 МПа. Конструкционно-теплоизоляционные блоки на данном составе рекомендуется применять при кладке стен одноэтажных зданий.

При плотности 950 кг/м<sup>3</sup> состав 1.23 с добавкой гиперпластификатора в количестве 1,5% от массы цемента имеет коэффициент теплопроводности равный 0,11 Вт/(м·°С), прочность на сжатие составляет 2,1 МПа. Время выдержки в форме 72 часа. Давление формования 1,5 МПа. Применение состава 1.23 для производства конструкционно-теплоизоляционных блоков позволит возводить двухэтажные здания с облегченными перекрытиями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Straw bale construction towards nearly-zero energy building design with low carbon emission in northern China / B. Rui, Z. Hongrui, M. Zixuan et al. // *Energy and Buildings*. – 2023. – Vol. 298. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113555.
2. Есельбаева А.Г., Книжигареева А.С. Энергоэффективный арболит для малоэтажного строительства // *Парадигма*. – 2021. – № 4. – С. 26–29.
3. Ягубкин А.Н., Бакатович А.А., Дембицкий Р.С. Влияние химических добавок на свойства цементного камня при разработке составов стеновых блоков на растительной основе // *Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: электрон. сб. ст. V Междунар. науч. конф. / Новополюцк (27 окт. 2023 г.) / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; редкол.: Д.Н. Лазовский (пред.) и др. – Новополюцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2024. – С. 325–328.*
4. Ягубкин А.Н., Бакатович А.А. Подбор гранулометрического состава и определение расхода растительного структурообразующего материала для стеновых блоков // *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: электрон. сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф. / Омск (23–24 нояб. 2023 г.) / СибАДИ; редкол.: А.П. Жигадло, П.А. Корчагин. – Омск: СибАДИ, 2023. – С. 590–594.*
5. Зайченко М.В., Курбатов В.Л. Новый строительный материал из соломы и земли // *Университет. наука*. – 2021. – № 1(11). – С. 45–47.
6. Building insulation materials based on agricultural wastes / F. Gaspar, A. Bakatovich, N. Davydenko et al. // *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction / F. Pacheco-Torgal, V. Ivanov, D.C.W. Tsang (Eds.)*. – 2020. – P. 149–170. – (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering). DOI: 10.1016/B978-0-12-819481-2.00008-8.
7. Semi-dry technology mediated lignocellulosic coconut and energy reed straw reinforced cementitious insulation panels / Z.M. Mucsi, K.M.F. Hasan, P.G. Horváth et al. // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – № 57. DOI: 10.1016/j.job.2022.104825.
8. Agro-industrial waste from corn straw fiber: Perspectives of application in mortars for coating and laying blocks based on Ordinary Portland cement and hydrated lime / L. Aquino, T. Ranilson, C. Silva et al. // *Construction and Building Materials*. – 2022. – № 353. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129111.
9. Experimental investigation of mechanical and microstructural properties of cemented paste backfill containing maple-wood filler / B. Koohestani, A. Koubaa, T. Belem et al. // *Construction and Building Materials*. – 2016. – № 121. – P. 222–228. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.118.
10. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates / A. Bouguerra, A. Ledhem, F. de Barquin et al. // *Cement and Concrete Research*. – 1998. – Vol. 28, № 8. – P. 1179–1190.
11. Mixture design and reaction sequence for recycling construction wood waste into rapid-shaping magnesia-phosphate cement particleboard / L. Wang, I.K.M. Yu, D.C.W. Tsang et al. // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2017. – № 56(23). – P. 6645–6654. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b01175.
12. Coatanlem P., Jauberthie R., Rendell F. Lightweight wood chipping concrete durability // *Construction and Building Materials*. – 2006. – № 20. – P. 776–781. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.057.
13. Costa H., Carmo R.N.F., Júlio E. Influence of lightweight aggregates concrete on the bond strength of concrete-to-concrete interfaces // *Construction and Building Materials*. – 2018. – № 180. – P. 519–530. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.011.

14. Simatupang M. Abbaureaktionen von glucose, cellobiose und holz unter dem einfluss von portlandzementmörtel // *Holzforschung*. – 1986. – № 40. – P. 149–155. DOI: 10.1515/hfsg.1986.40.3.149.
15. Miller D.P., Moslemi A. Wood-cement composites: species and heartwood-sapwood effects on hydration and tensile strength // *Wood Fiber Sci.* – 1991. – № 41(3). – P. 9–14.
16. Miller D.P., Moslemi A. Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength // *Wood Fiber Sci.* – 1991. – № 23(4). – P. 472–482.
17. Цементный фибролит / Б.Н. Кауфман, Л.М. Шмидт, Д.А. Скоблов и др. – М.: Стройиздат, 1961. – 166 с.
18. Майоров П.М. Бетонные смеси: рецептурный справочник для строителей и производителей строительных материалов. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 461 с.
19. Наназашвили И.Х. Структурообразование древесно-цементных композитов на основе ВНВ // *Бетон и железобетон*. – 1991. – № 12. – С. 15–17.
20. Ахназарова С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1978. – 318 с.

## REFERENCES

1. Rui, B., Hongrui, Z., Zixuan, M., Riyong, Y., An, L. & Xunzhi, Y. (2023). Straw bale construction towards nearly-zero energy building design with low carbon emission in northern China. *Energy and Buildings*, (298). DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113555.
2. Esel'baeva, A.G. & Kinzhigareeva, A.S. (2021). Energoeffektivnyi arbolit dlya maloetazhnogo stroitel'stva. *Paradigma*, (4), 26–29. (In Russ.).
3. Yagubkin, A.N., Bakatovich, A.A. & Dembitskii, R.S. (2024). Vliyanie khimicheskikh dobavok na svoystva tsementnogo kamnya pri razrabotke sostavov stenovykh blokov na rastitel'noi osnove. *Arkhitekturno-stroitel'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii [Elektronnyi resurs]: elektron. sb. st. V Mezhdunar. nauch. konf. / Novopolotsk (27 okt. 2023 g.)* (325–328). Novopolotsk: Polots. gos. un-t im. Evfrosinii Polotskoi. (In Russ.).
4. Yagubkin, A.N. & Bakatovich, A.A. Podbor granulometricheskogo sostava i opredelenie raskhoda rastitel'nogo strukturoobrazuyushchego materiala dlya stenovykh blokov. *Arkhitekturno-stroitel'nyi i dorozhno-transportnyi komplekсы: problemy, perspektivy, innovatsii [Elektronnyi resurs]: elektron. sb. materialov VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. Konf. / Omsk (23–24 noyab 2023 g.)* (590–594). Omsk: SibADI. (In Russ.).
5. Zaichenko, M.V. & Kurbatov, V.L. (2021). Novyi stroitel'nyi material iz solomy i zemli. *Universitetskaya nauka*, 1(11), 45–47. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Gaspar, F., Bakatovich, A., Davydenko, N. & Joshi, A. (2020). Building insulation materials based on agricultural wastes. In F. Pacheco-Torgal, V. Ivanov & D.C.W. Tsang (Eds.). *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction* (149–170). DOI: 10.1016/B978-0-12-819481-2.00008-8.
7. Mucsi, Z.M., Hasan, K.M.F., Horváth, P.G., Bak, M., Kóczán, Z. & Alpár, T. (2022). Semi-dry technology mediated lignocellulosic coconut and energy reed straw reinforced cementitious insulation panels. *Journal of Building Engineering*, (57). DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104825.
8. Aquino, L., Ranielson, T., Silva, C., Teixeira, M., Afoso, M. & Azevedo, R. (2022). Agro-industrial waste from corn straw fiber: Perspectives of application in mortars for coating and laying blocks based on Ordinary Portland cement and hydrated lime. *Construction and Building Materials*, (353). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129111.
9. Koohestani, B., Koubaa, A., Belem, T., Bussiére, B. & Bouzazhah, H. (2016). Experimental investigation of mechanical and microstructural properties of cemented paste backfill containing maple-wood filler. *Construction and Building Materials*, (121), 222–228. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.118.
10. Bouguerra, A., Ledhem, A., de Barquin, F., Dheilily, R.M. & Que'neudec, M. (1998). Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. *Cement and Concrete Research*, 28(8), 1179–1190.
11. Wang, L., Yu, I.K.M., Tsang, D.C.W., Li, Sh. & Poon, Ch.S. (2017). Mixture design and reaction sequence for recycling construction wood waste into rapid-shaping magnesia-phosphate cement particleboard. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 56(23), 6645–6654. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b01175.
12. Coatanlem, P., Jauberthie, R. & Rendell, F. (2006). Lightweight wood chipping concrete durability. *Construction and Building Materials*, (20), 776–781. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.057.
13. Costa, H., Carmo, R.N.F. & Júlio, E. (2018). Influence of lightweight aggregates concrete on the bond strength of concrete-to-concrete interfaces. *Construction and Building Materials*, (180), 519–530. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.011.
14. Simatupang, M. (1986). Abbaureaktionen von glucose, cellobiose und holz unter dem einfluss von portlandzementmörtel. *Holzforschung*, (40), 149–155. DOI: 10.1515/hfsg.1986.40.3.149.
15. Miller, D.P. & Moslemi, A. (1991). Wood-cement composites: species and heartwood-sapwood effects on hydration and tensile strength. *Wood Fiber Sci.*, 41(3), 9–14.
16. Miller, D.P. & Moslemi, A. (1991). Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. *Wood Fiber Sci.*, 23(4), 472–482.
17. Kaufman, B.N., Shmidt, L.M., Skoblov, D.A. & Povolotskii A.S. (1961). *Tsementnyi fibrolit*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
18. Maiorov, P.M. (2009). *Betonnye smesi: retsepturnyi spravochnik dlya stroitelei i proizvoditelei stroitel'nykh materialov*. Rostov-on-Don: Feniks. (In Russ.).
19. Nanazashvili, I.Kh. (1991). Strukturoobrazovanie drevesno-tsementnykh kompozitov na osnove VNV. *Beton i zhelezobeton*, (12), 15–17. (In Russ.).
20. Akhnazarova, S.L. (1978). *Optimizatsiya eksperimenta v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).

Поступила 30.11.2024

**THE INFLUENCE OF CHEMICAL ADDITIVES ON THE PROPERTIES  
OF WALL BLOCKS MADE OF WHEAT STRAW**

**A. YAGUBKIN, A. BAKATOVICH**  
*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*The article presents for the first time in the Republic of Belarus the results of studies of chemical additives affecting the physical and mechanical properties of wheat straw blocks. The subject of the study is the physical and mechanical properties of the cement component and wall blocks made of wheat straw. Based on the experiment and the analysis of its results, compositions for the manufacture of structural and heat-insulating blocks made of wheat straw were proposed and patented. Structural and heat-insulating blocks on these compositions are recommended for use in laying walls of one- and two-story buildings. The results of the study can be used to select compositions in the production of building materials and products from plant materials, in the educational process of construction specialties of universities.*

**Keywords:** *vegetable raw material, wheat straw, chemical additive, setting time of cement paste, normal density of cement paste, molding pressure, wall material, average density, thermal conductivity coefficient, compressive strength.*

## ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.112

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-74-79

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСШИРЕННОЙ МОДЕЛИ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ  
ДЛЯ ПОИСКА ГРУБЫХ ОШИБОК В РЯДЕ МНОГОКРАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙканд. техн. наук, доц. А.М. ДЕГТЯРЕВ, А.С. ИВАШНЁВА  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Для поиска грубых ошибок в ряде многократно измеренных значений одной величины использована расширенная модель метода наименьших квадратов, при которой грубые ошибки включены в определяемые величины. Окончательная локализация грубых ошибок проводится на основе статистического тестирования по полученному одномерному алгоритму на основе алгоритма *data snooping*, разработанного в 50-х годах голландским геодезистом Baarda.

**Ключевые слова:** метод наименьших квадратов, расширенная модель уравнивания, статистическое тестирование, грубая ошибка, многократно измеренная величина.

**Введение.** Для уравнивания и анализа разного рода геодезических построений разработан очень эффективный математический аппарат на основе метода наименьших квадратов (МНК) и разного рода расширенных моделей. Этот же аппарат можно применить для обработки и анализа одной многократно измеренной равнозначной (неравнозначной), некоррелированной (коррелированной) величины. Также этот аппарат можно использовать без привлечения дополнительных условий для выявления в ряде измерений грубых ошибок.

Выявления грубых ошибок при обработке одной многократно измеренной величины имеет большое значение для геодезической практики и достаточно давнюю историю [2; 3]. Первые алгоритмы, разработанные классиками математической статистики, относятся к XIX веку [4]. Но алгоритмы носят частный характер и стоят как бы поодаль от общей процедуры получения наиболее эффективной оценки из ряда многократных измерений одной величины. В 50-е годы XX века голландский геодезист Baarda предложил алгоритм уравнивания геодезических сетей с включением в модель обработки грубых ошибок в качестве неизвестных [1]. В настоящее время этот алгоритм под именем *data snooping* используется в матричной форме, представленный также голландским ученым-геодезистом Teunissen [5].

**Основная часть.** При анализе формул Teunissen [5] было замечено, что если матрицу уравнений поправок  $A$  параметрического способа уравнивания с расширенной моделью заменить на единичный вектор-столбец  $e$ , то получится простой, обоснованный, достаточно информативный и мощный алгоритм локализации грубых ошибок в ряде значений одной многократно измеренной величины. Рассмотрим этот подход подробно.

Пусть некоторая истинная величина  $Y$  измерена  $n$  раз как  $y_i$ , с целью определения ее значения и точности.

Введем следующие обозначения:

$Y$  – истинные результаты измерения;

$X$  – истинное значение определяемой величины;

$y_i$  – измеренные величины;

$\hat{y}_i$  – уравненное значение (оценка) определяемой величины;

$\hat{x}$  – уравненное значение (оценка) результатов измерений.

Так как истинное значение  $X$  определяемой величины должно равняться истинным результатам измерений  $Y$   $n$  раз, то в самом общем, матричном виде это можно записать как

$$Y = e \cdot X, \quad (1)$$

где  $e$  – вектор-столбец из единиц по числу измерений  $e = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}$ .

Очевидно, что поскольку истинных измерений  $Y$  мы не знаем, то их можно заменить на уравненные, вида

$$Y \approx \hat{y}_i = y_i + v_i, \quad (2)$$

откуда следует, что  $v = Y - y \approx \Delta$ . Т.е. уклонения  $v$  в совокупности должны стремиться к истинным ошибкам  $\Delta$ , а их оценки

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\Delta^T \cdot \Delta}{n}} \approx \sqrt{\frac{v^T \cdot v}{n}}$$

достаточно эквивалентны. Если в (1) заменить истинное значение определяемой величины  $X$  на ее оценку,  $X \approx \hat{x}$ , то объединяя с (2) в матричном виде получим

$$y + v = e \cdot \hat{x}. \quad (3)$$

В алгебраическом виде (3) для  $n$  измерений имеет вид

$$\begin{cases} y_1 + v_1 = 1 \cdot \hat{x} \\ y_2 + v_2 = 1 \cdot \hat{x} \\ \dots \\ y_n + v_n = 1 \cdot \hat{x}. \end{cases} \quad (3a)$$

Для решения несовместной системы (3) применим МНК с условием качества  $\Phi = v^T \cdot P \cdot v \rightarrow \min$ . Тогда имеем

$$e^T \cdot P \cdot e \cdot \hat{x} = e^T \cdot P \cdot y, \quad (4)$$

а искомая оценка из (4) величины  $\hat{x}$  будет

$$\hat{x} = (e^T \cdot P \cdot e)^{-1} \cdot e^T \cdot P \cdot y \rightarrow \frac{e^T \cdot P \cdot y}{e^T \cdot P \cdot e}, \quad (5)$$

так как и первый, и второй множитель в (5) числа. Здесь  $P$  – матрица весов измерений, которая может быть единичной, диагональной или полной. Формула (6) эквивалентна эффективной МНК-оценке при уравнивании геодезической сети параметрическим способом, когда матрица уравнений поправок  $A$  равна единичному вектору  $e$ . Если  $P = E$ , тогда из (5) имеем среднее арифметическое

$$\hat{x} = \frac{[y]}{n} = \bar{x}_1. \quad (6)$$

Если матрица весов  $P$  диагональная, то получаем формулу известного среднего взвешенного значения

$$\hat{x} = \frac{[p \cdot y]}{[p]} = \bar{x}_2. \quad (6b)$$

Если матрица  $P$  полная, то для оценки алгебраический вид очень громоздок и необходимо применять формулу (5), которая является наиболее общей и содержит все перечисленные варианты как частные случаи.

Погрешность одного измерения (погрешность единицы веса) после обработки по Бесселю будет

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{v^T \cdot v}{n-1}},$$

погрешность среднего арифметического

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = (e^T \cdot e)^{-1} \cdot e^T \cdot \sigma_0^2 \cdot e \cdot (e^T \cdot e)^{-1} = \sigma_0^2 \cdot (e^T \cdot e)^{-1} = \frac{\sigma_0^2}{n}.$$

Уравненные измерения  $\hat{y} = y + v$

$$\hat{y} = y + v = y + e \cdot (e^T \cdot e)^{-1} \cdot e^T \cdot y = \frac{I}{n} \cdot y = \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \dots \\ \bar{x} \end{bmatrix} \cdot e \cdot \bar{x}. \quad (7)$$

Поправки в измерения будут

$$v = e \cdot (e^T \cdot e)^{-1} \cdot e^T \cdot y = \frac{I}{n} \cdot y, \quad (8)$$

где  $I$  – матрица из единиц ( $n \times n$ );

$E$  – единичная матрица ( $n \times n$ ).

Погрешность уравненного измерения

$$K_{\hat{y}} = e \cdot (e^T \cdot e)^{-1} \cdot e^T \cdot \sigma_0^2 \cdot e \cdot (e^T \cdot e)^{-1} \cdot e^T = \frac{e \cdot e^T}{n} = \frac{\sigma_0^2}{n}. \quad (9)$$

Пусть теперь в модели (3а) имеем в  $i$ -м измерении грубую ошибку  $\nabla l$

$$\begin{aligned} v_1 &= 1 \cdot \hat{x} - y_1 \\ &\dots \\ v_i &= 1 \cdot \hat{x} - (y_i + \nabla l) \\ &\dots \\ v_n &= 1 \cdot \hat{x} - y_n. \end{aligned} \quad (10)$$

В матричном виде эту модель как расширенную модель метода наименьших квадратов можно представить следующим образом:

$$v_{\nabla} = e \cdot \hat{x}_{\nabla} - y - c \cdot \nabla l = e \cdot \hat{x}_{\nabla} - c \cdot \nabla l - y, \quad (11)$$

где  $c$  – нулевой вектор столбец с единицей на  $i$ -м месте;

индекс набла  $\nabla$  добавляется к поправкам и к оценке, так как они будут искажены дополнительным влиянием – грубой ошибкой  $\nabla l$ .

Систему (5) можно свернуть как

$$v_{\nabla} = (e \quad -c) \cdot \begin{pmatrix} \hat{x}_{\nabla} \\ \nabla l \end{pmatrix} - y. \quad (11a)$$

Применив к системе (5) МНК в виде левой трансформации Гаусса с весами  $P$  получим

$$\begin{pmatrix} e^T \\ -c^T \end{pmatrix} \cdot P \cdot v = \begin{pmatrix} e^T \\ -c^T \end{pmatrix} \cdot P \cdot \left[ (e \quad -c) \cdot \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \nabla l \end{pmatrix} - y \right], \quad (12)$$

или

$$\begin{aligned} 0 &= \begin{bmatrix} e^T \cdot P \cdot e & -e^T \cdot P \cdot c \\ -c^T \cdot P \cdot e & c^T \cdot P \cdot c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_{\nabla} \\ \nabla l \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e^T \cdot P \cdot y \\ -c^T \cdot P \cdot y \end{bmatrix} \\ &\rightarrow \begin{bmatrix} n & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \nabla l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [y] \\ -y_i \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Обратная матрица системы (5)

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & n \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{n-1},$$

а решение

$$\left\{ \begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{x}_{\nabla} \\ \nabla l \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & n \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \begin{bmatrix} [y] \\ -y_i \end{bmatrix} \\ \hat{x}_{\nabla} &= \frac{[y] - y_i}{n-1} \\ \nabla l &= \frac{[y] - y_i \cdot n}{n-1} = \frac{\bar{x} - y_i}{\left(\frac{n-1}{n}\right)} = \frac{n \cdot v_i}{n-1}. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Влияние ожидаемой ошибки (дополнительного влияния) на результаты обработки из (6)

$$\nabla \hat{x} = (e^T \cdot P \cdot e)^{-1} \cdot e^T \cdot P \cdot c \cdot \nabla l = \frac{e^T \cdot P \cdot c \cdot n}{e^T \cdot P \cdot e \cdot (n-1)} \cdot v_i. \quad (14)$$

Ковариационная матрица  $Q_{\nabla l}^{-1} = \frac{n-1}{n}$ , тогда статистика для  $\nabla l$  есть [1]

$$T = \frac{\nabla l^2 \cdot Q_{\nabla l}^{-1}}{1 \cdot \sigma_0^2} = \frac{(\bar{x} - y_i)^2 \cdot \left(\frac{n-1}{n}\right)}{\left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot \sigma_0^2} = \frac{(\bar{x} - y_i)^2}{\left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot \sigma_0^2}, \quad \sqrt{T} = \frac{\bar{x} - y_i}{\sigma_0 \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}}}. \quad (15)$$

Используя процедуру data snapping [1; 5] для статистики  $T$ , получаем

$$\sqrt{T} \leq z(p),$$

где  $z(p)$  – квантиль нормального распределения для двухсторонней доверительной вероятности  $p$ .

Таким образом, если это условие выполняется для  $i$ -го измерения, то это измерение не содержит грубую ошибку с доверительной вероятностью  $p$ .

Сама процедура тестирования достаточно проста. Из (15) видим, что  $\bar{x} - y_i = v_i$ , а знаменатель – число постоянное. Тогда получаем алгоритм вида

$$\sqrt{T_i} = \frac{v_i}{k} \leq z(p). \quad (16)$$

Формула (16) замечательна тем, что не использует никаких дополнительных, часто сомнительных предположений и упрощений, а только строгую математическую модель (11) с включением в обработку грубой ошибки как дополнительного определяемого параметра.

Рассмотрим пример. Пусть значение длины измерено 20 раз в одинаковых условиях с ошибкой  $\sigma = 0,005$  м. В результате сбоя прибора в 5 измерениях появилась ошибка в 0,02 м (изначально неизвестно ни ее значение, ни номер измерения).

$$x = \begin{bmatrix} 436,257 \\ 436,256 \\ 436,248 \\ 436,256 \\ 436,273 \\ 436,252 \\ 436,251 \\ 436,254 \\ 436,247 \\ 436,262 \\ 436,260 \\ 436,257 \\ 436,257 \\ 436,253 \\ 436,262 \\ 436,256 \\ 436,253 \\ 436,264 \\ 436,256 \\ 436,254 \end{bmatrix}.$$

В качестве оценки используем среднее арифметическое  $\bar{x} = 436,2564$  м из ряда, и находим вектор отклонений от среднего  $v$

$$v = \begin{bmatrix} 0,001 \\ 0,000 \\ -0,008 \\ 0,000 \\ 0,017 \\ -0,004 \\ -0,005 \\ -0,002 \\ -0,009 \\ 0,006 \\ 0,004 \\ 0,001 \\ 0,001 \\ -0,003 \\ 0,006 \\ 0,000 \\ -0,003 \\ 0,008 \\ 0,000 \\ -0,002 \end{bmatrix}.$$

По величинам отклонений пятое измерение наиболее подозрительное. Используя (15) и заданное значение стандартного отклонения, получаем значения статистик для  $i$ -го измерения

$$T = \begin{bmatrix} 0,21 \\ 0,00 \\ -1,64 \\ 0,00 \\ 3,49 \\ -0,82 \\ -1,03 \\ -0,41 \\ -1,85 \\ 1,23 \\ 0,82 \\ 0,21 \\ 0,21 \\ -0,62 \\ 1,23 \\ 0,00 \\ -0,62 \\ 1,64 \\ 0,00 \\ -0,41 \end{bmatrix}.$$

Выдвигаем гипотезу, что с вероятностью 0,95 любое из измерений ряда является грубым. Для вероятности 0,95, согласно процедуре data snooping (16), получаем квантиль нормального закона распределения  $z = 1,96$  и сравниваем ряд статистик  $T$  с квантилем. Неравенство не выполняется только для пятого измерения, которое необходимо с вероятностью 95% признать грубым измерением, изъять из ряда и провести повторно обработку и контроль.

Далее, используя формулу (13), для величины дополнительного влияния по модели (11) имеем  $\nabla \hat{l} = -0,018$ , что достаточно хорошо определяет величину грубой ошибки в 0,02 м, которая должна быть изъята из измерения, поэтому знак вычисленного значения противоположный.

**Заключение.** Таким образом, можно сделать вывод, что используя расширенную модель (11), когда грубая ошибка включена в определяемые параметры, и используя способ тестирования data snooping без привлечения дополнительных предположений, можно достаточно корректно определить номер грубого измерения и предрасчитать значения грубой ошибки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren / R. Jager, T. Muller, H. Saler et al. – Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2005. – 340 p.
2. Коугия В.А., Павлов В.И. Современные проблемы уравнивания инженерно-геодезических сетей. – СПб.: Нац. минер.-сырьевой ун-т «Горный», 2012. – 105 с.
3. Голубев В.В. Теория математической обработки геодезических измерений. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 424 с.
4. Дегтярёв А.М. Теория погрешностей и статистический анализ [Электронный ресурс]: электрон. конспект лекций. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2023. – 1 эл. опт. диск (CD-R).
5. Teunissen P.J.G. Testing theory: an introduction. – Delft: VSSD, Delft university press, 2024. – 199 p.

#### REFERENCES

1. Jager, R., Muller, T., Saler, H. & Schwable, R. (2005). *Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren*. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag.
2. Kougiya, V.A. & Pavlov V.I. (2012). *Sovremennye problemy uravnivaniya inzhenerno-geodezicheskikh setei*. Saint Petersburg: Nats. miner.-syr'evoi un-t «Gornyi». (In Russ.).
3. Golubev, V.V. (2021). *Teoriya matematicheskoi obrabotki geodezicheskikh izmerenii*. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya. (In Russ.).
4. Degtyarev, A.M. (2023). *Teoriya pogreshnostei i statisticheskii analiz* [Elektronnyi resurs]: elektron. konsp. lektzii. Novopolotsk: Polots. gos. un-t im. Evfrosinii Polotskoi. (In Russ.).
5. Teunissen, P.J.G. (2024). *Testing theory: an introduction*. Delft: VSSD, Delft university press.

Поступила 28.10.2024

### USING AN EXTENDED LEAST SQUARES MODEL TO FIND GROSS ERRORS IN A SERIES OF MULTIPLE MEASUREMENTS

A. DEGTJAREV, A. IVASHNIOVA  
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*To find gross errors in a series of repeatedly measured values of one quantity, an extended model of the least squares method is used, in which gross errors are included in the determined values. The final localization of gross errors is carried out on the basis of statistical testing according to the obtained one-dimensional algorithm based on the data snooping algorithm developed in the 50s by the Dutch surveyor Baarda.*

**Keywords:** least squares method, extended adjustment model, statistical testing, gross error, repeatedly measured value.

УДК 551.24

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-80-87

**ВЫПОЛНЕНИЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ  
НА ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ «ПОЛОЦКАЯ ГЭС»**

канд. техн. наук, доц. **К.И. МАРКОВИЧ**,  
канд. техн. наук, доц. **В.В. ЯЛТЫХОВ**,  
**П.С. ДОЛГИЙ**

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье представлена информация о тектонических разломах и разрывных нарушениях, простирающихся в окрестностях Полоцкой ГЭС. Приведены сведения о предыдущих геодинамических исследованиях на геодинамическом полигоне «Полоцкая ГЭС». Охарактеризованы процесс выполнения и результаты полевых гравиметрических измерений на пунктах геодинамического полигона «Полоцкая ГЭС» в 2024 году. Построена схема площадного распределения поля силы тяжести на территории ГДП «Полоцкая ГЭС».

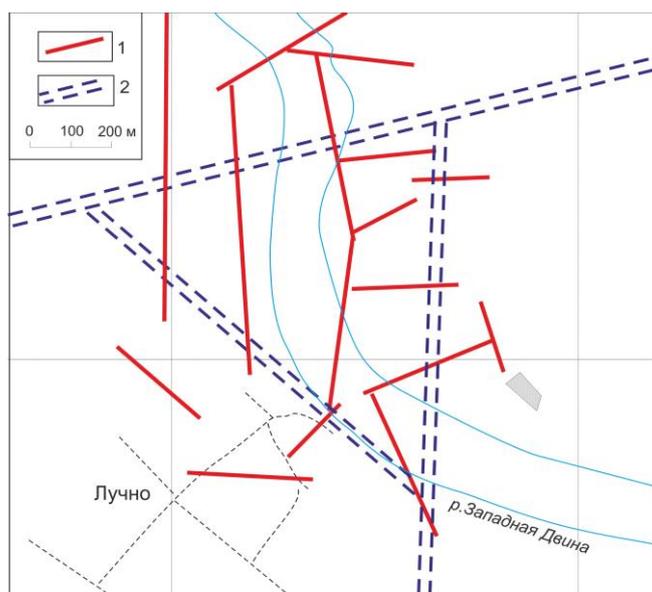
**Ключевые слова:** гравиметрические измерения, геодинамический полигон, гравиметр, вертикальный градиент нормальной силы тяжести, вариации гравитационного поля.

**Введение.** В данной статье представлены результаты полевых гравиметрических измерений, проведенных на пунктах геодинамического полигона «Полоцкая ГЭС» (ГДП). Геодинамический полигон «Полоцкая ГЭС» создан в 2014 году в виде структурной пространственной модели, в целях мониторинга взаимообусловленного влияния тектонических и техногенных факторов в зоне линейных геологических структур в окрестностях Полоцкой ГЭС.

ГДП запроектирован с учетом результатов геодинамических исследований, проведенных Полоцким государственным университетом, Центром геофизического мониторинга Национальной академии наук РБ, Институтом геологических наук в 2006–2013 гг. на сопредельных Полоцкой ГЭС территориях. Краткое изложение основных результатов данных исследований приведено ниже.

В отчете<sup>1</sup> составлена схема расположения линеаментов и тектонических разломов на территории Полоцкой ГЭС (рисунок 1) и выявлены следующие факты:

- вероятной причиной излучины реки Западная Двина в месте проектируемого расположения плотины гидроузла является фрагмент относительно региональных разломов кристаллического фундамента;
- на площадке строительства присутствует сейсмическая опасность, главным образом от местных, с малой магнитудой, а также сильных землетрясений в других регионах;
- с целью прогноза возможного проявления сейсмичности и активности разломов рекомендовано выполнение постоянного геодинамического мониторинга (геофизического, сейсмологического и геодезического) в районе размещения Полоцкой ГЭС и сопредельных территориях.



1 – локальные разломы осадочного чехла; 2 – фрагменты относительно региональных разломов в кристаллическом фундаменте

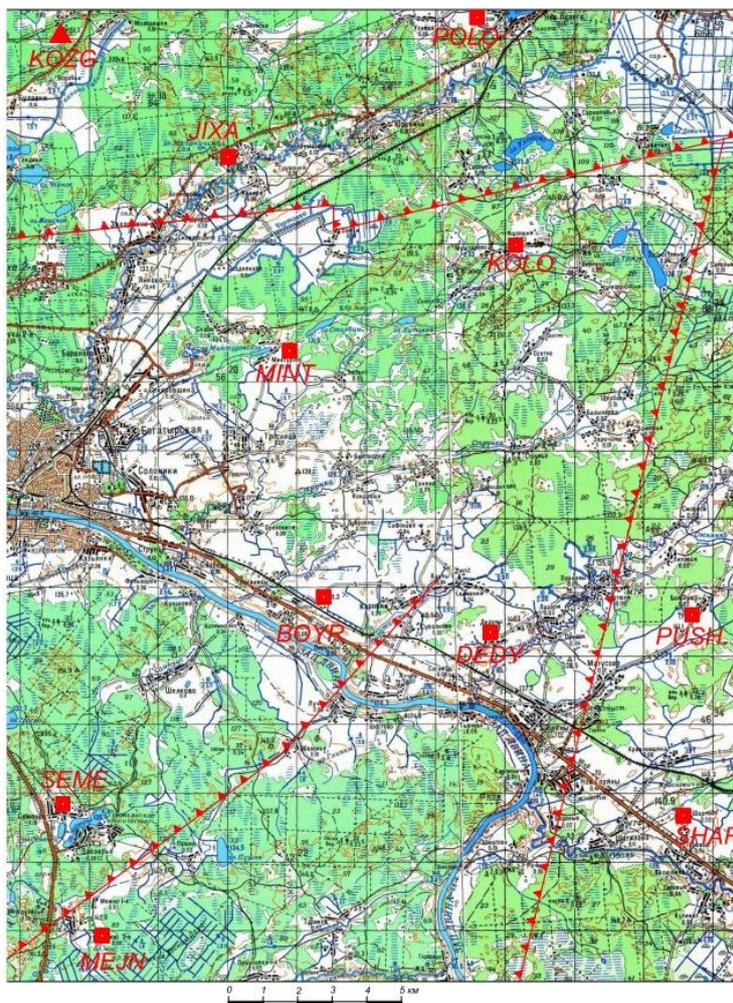
Рисунок 1. – Схема расположения разломов на сопредельных Полоцкой ГЭС территориях

<sup>1</sup> Выполнение предпроектных геодинамических исследований в районе предполагаемого строительства Полоцкой ГЭС: отчет о ХД НИР / Полоц. гос. ун-т.; рук. Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2006. – 64 с. – № ГР 6-1153/26552.

Как показали исследования 2006–2010 гг.<sup>2,3</sup>, фрагменты относительно региональных разломов в кристаллическом фундаменте (см. рисунок 1) имеют свойства развивающихся разломных зон. Такие зоны слабо отражаются в крупномасштабных потенциальных геофизических полях, но при этом могут привести к дестабилизации геодинамической обстановки в их окрестностях. Главные опасения вызывают активные процессы, связанные с зоной динамического влияния Туровлянского разлома, пересекающего р. Западная Двина в месте расположения гидроузла Полоцкой ГЭС.

Подобные геодинамические процессы, происходящие в зонах тектонических нарушений, и вызванные ими знакопеременные деформации и сдвиги несут серьезную опасность для инженерных объектов и сооружений, находящихся в зоне влияния подвижных тектонических структур [1], что, в том числе, актуально для Полоцкой ГЭС.

Расположение пунктов на сопредельных Полоцкой ГЭС территориях при проектировании ГДП в 2014 г. выбиралось исходя из необходимости мониторинга Чашникского, Полоцкого и Туровлянского разломов с учетом конфигурации дорожной сети. В геодезическую сеть, в дополнение к десяти пунктам, представленным на рисунке 2, включен пункт KOZG (возле деревни Козьи горки) с целью связать пункты в районе Полоцкой ГЭС и пункты Полоцкого геодинамического профиля<sup>4,5</sup>, расположенного в Полоцко-Курземской зоне тектонических разломов. Общая схема расположения пунктов геодинамического полигона Полоцкой ГЭС приведена на рисунке 2.



**DEDY, BOYR, SEME, MEJN – пункты, контролирующие Туровлянский разлом;  
POLO, KOLO, JIXA, MINT – Полоцкий; DEDY, KOLO, PUSH, SHAR – Чашникский**

**Рисунок 2. – Расположение пунктов геодинамического полигона относительно тектонических разломов на сопредельных Полоцкой ГЭС территориях**

<sup>2</sup> Заложить геофизические реперы и создать локальные сети полигонов: Полоцкого – в 2006 году, Краснослободского – в 2007 году, Лидского – в 2008 году, Борисовского – в 2009 году, Глушкевичского – в 2010 году: отчет о НИР (заключ.) / Ин-т природопользования НАНБ; рук. О.В. Мясников. – Минск, 2010. – 105 с. – № ГР.20093422. – Инв. № 52391.

<sup>3</sup> Инструментальные исследования современной геодинамики в Полоцком регионе: отчет о НИР ГПНИ «Природно-ресурсный потенциал» Задание 5.4.15 «Геологические модели» / Полоц. гос. ун-т.; рук. Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2015. – 85 с. – № ГР 20142987.

<sup>4</sup> См. сноску 2.

<sup>5</sup> Диагностика современных движений земной коры Беларуси по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований: отчет о НИР / Полоц. гос. ун-т.; рук. Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2010. – 165 с. – № ГР 20062107.

Для повышения надежности выбора мест закладки центров пунктов на ГДП «Полоцкая ГЭС» было выполнено структурное дешифрирование материалов дистанционного зондирования Земли с аппарата Landsat-5 и аэрофотосъемок специалистами отдела аэрокосмических исследований государственного предприятия «НПЦ по геологии» НАНБ. В результате было выявлено, что изучаемая территория в структурном отношении имеет разломно-блоковое строение, которое отражает интенсивные глубинные процессы, происходящие в земной коре на современном этапе тектонического развития. Восточнее г. Полоцка на правом берегу р. Западная Двина находится крупный блок земной коры, который испытывает поднятие на фоне общего опускания окружающей территории. Данный блок покрывает основную часть изучаемой территории.

На пунктах ГДП «Полоцкая ГЭС» в период с 2014 г. по 2022 г. сотрудниками кафедры геодезии и геоинформационных систем Полоцкого государственного университета выполнено 5 циклов высокоточных ГНСС-наблюдений с целью получения характеристик деформаций земной поверхности в указанном районе. По результатам математической обработки инструментальных наблюдений получены компоненты деформаций (дилатация, максимальный сдвиг, максимальное и минимальное растяжение), построены схемы векторов смещений пунктов ГДП и схемы разностей длин сторон геодезической сети.

**Основная часть.** Результаты инструментальных геодезических измерений, выполненных на ГДП «Полоцкая ГЭС» в период 2014–2022 гг., подтвердили наличие на исследуемой территории значимых деформаций земной поверхности, что в свою очередь подтверждает данные предпроектных исследований в районе строительства ГЭС<sup>6</sup>. Известно [2–5], что геодинимические процессы, сопровождающиеся деформациями земной поверхности, тесно связаны с изменением геофизических полей. Представленные факторы стали основополагающими для начала выполнения гравиметрических измерений на ГДП «Полоцкая ГЭС».

Работы выполнены в рамках ГБ-0921 «Оценка и моделирование влияния геодинимики и техногенеза на геоэкологические и инженерно-геологические процессы в пределах Беларуси по материалам современных геолого-геофизических и геодезических исследований» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.), НИР «Исследование современной геодинимики территории Республики Беларусь геодезическими методами» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.), ГБ 0524 «Разработка веб-ГИС-проекта “Геодинимика и техногенез Беларуси”» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.).

Относительные гравиметрические измерения на пунктах ГДП выполнены в июле 2024 года сотрудниками кафедры геодезии и геоинформационных систем учреждения образования Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. Измерения выполнены двумя механическими наземными узкодиапазонными гравиметрами с кварцевой чувствительной системой класса В (ГНУКВ № 437 1991 г. и ГНУКВ № 484 1991 г.).

В состав работ вошли:

- проверка уровней гравиметра;
- определение скорости смещения нуль-пункта гравиметра, его линейности и продолжительности полевого рейса;
- выполнение контрольных измерений на эталонном базисе;
- проектирование, проложение и обработка гравиметрических рейсов.

Все исследования выполнены в специализированной лаборатории гравиметрии кафедры геодезии и геоинформационных систем в соответствии с ГОСТ 13017-83 «Гравиметры наземные. Общие технические условия»<sup>7</sup>.

Проверка уровней каждого гравиметра выполнялась на основании условия, что при неверно установленных уровнях в результате измерений войдет погрешность  $\Delta g$ , равная [6]

$$\Delta g = -\frac{g_0 \cdot \beta^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\Delta g$  – погрешность за наклон гравиметра;

$\beta$  – угол наклона гравиметра;

$g_0$  – приблизительное значение ускорения силы тяжести в точке стояния прибора.

Результаты исследований уровней обоих гравиметров ГНУКВ показали исправность уровней. Графики зависимости  $\Delta g$  от  $\beta$  для продольного и поперечного уровней гравиметра ГНУКВ № 437 представлены на рисунке 3.

Скорость смещения нуль-пункта гравиметра, его линейность и продолжительность полевого рейса определялись путем исследования гравиметра на смещение нуль-пункта. Методика исследования строго соответствовала ГОСТ 13017-83. Результаты показали, что смещение нуль-пункта обоих гравиметров ГНУКВ линейно в течение 5 часов и скорость смещения не превышает допустимой величины в 2 мГал/сутки. Процесс исследования гравиметров на смещение нуль-пункта представлен на рисунке 4.

<sup>6</sup> См. сноску 1.

<sup>7</sup> ГОСТ 13017-83. Гравиметры наземные. Общие технические условия. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999 (Переиздание с изменениями).

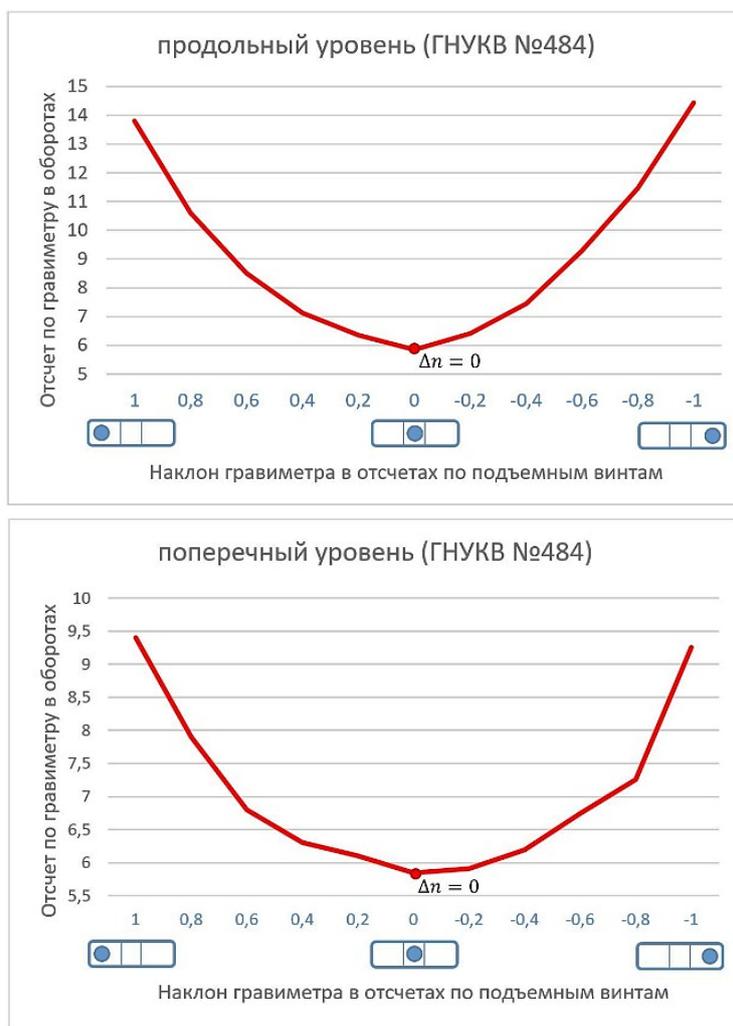


Рисунок 3. – Графики зависимости погрешности  $\Delta n$  от угла наклона плоскости  $\beta$ , проходящей через ось подвеса и нить маятника гравиметра



Рисунок 4. – Исследование гравиметров ГНУКВ на смещение нуля-пункта

Для контроля стабильности постоянных гравиметров и определения пригодности гравиметров к работе выполнялись контрольные измерения на эталонном базисе. В качестве базиса были выбраны два пункта Полоцкого геодинимического профиля (№ 59 и № 5960). Представленные пункты имеют максимальное приращение ускорения силы тяжести. Приращение ускорения силы тяжести на пунктах № 59 и № 5960 было вычислено на основании

гравиметрических измерений, выполненных в июле 2024 года специалистами топографо-геодезического предприятия «Белгеодезия» гравиметром Scintrex CG-6 AutoGrav (рисунок 5). Для обеспечения высокой точности измерений специалистами предприятия «Белгеодезия» использовался относительный метод с быстрым возвращением на первоначальный пункт по схеме  $A(t^*A) \rightarrow A(tB) \rightarrow A(t^*A)$ . Контрольные измерения приращения ускорения силы тяжести базиса № 59 – № 5960 гравиметрами ГНУКВ выполнены трижды. Было установлено, что постоянные гравиметров соответствуют паспортным значениям, точность определения приращения близка к заявленной.



Рисунок 5. – Выполнение гравиметрических измерений гравиметром Scintrex CG-6 AutoGrav на одном из пунктов Полоцкого геодинамического профиля

Проектирование гравиметрических рейсов выполнялось с учетом расположения пунктов на ГДП и возможности подъезда к ним, а также с учетом времени, в течение которого смещение нуля-пункта гравиметра линейно во времени. В результате запроектировано три гравиметрических рейса, замыкающихся на едином для них исходном пункте № 59 (являющимся также начальным пунктом Полоцкого геодинамического профиля). Продолжительность каждого рейса составляла от 2 до 3 часов, что не превышает времени, в течение которого смещение нуля-пункта гравиметров линейно. Также можно отметить, что приращение поля за столь малый период времени равно нулю [7].

Схема запроектированных гравиметрических рейсов по пунктам ГДП «Полоцкая ГЭС» представлена на рисунке 6.

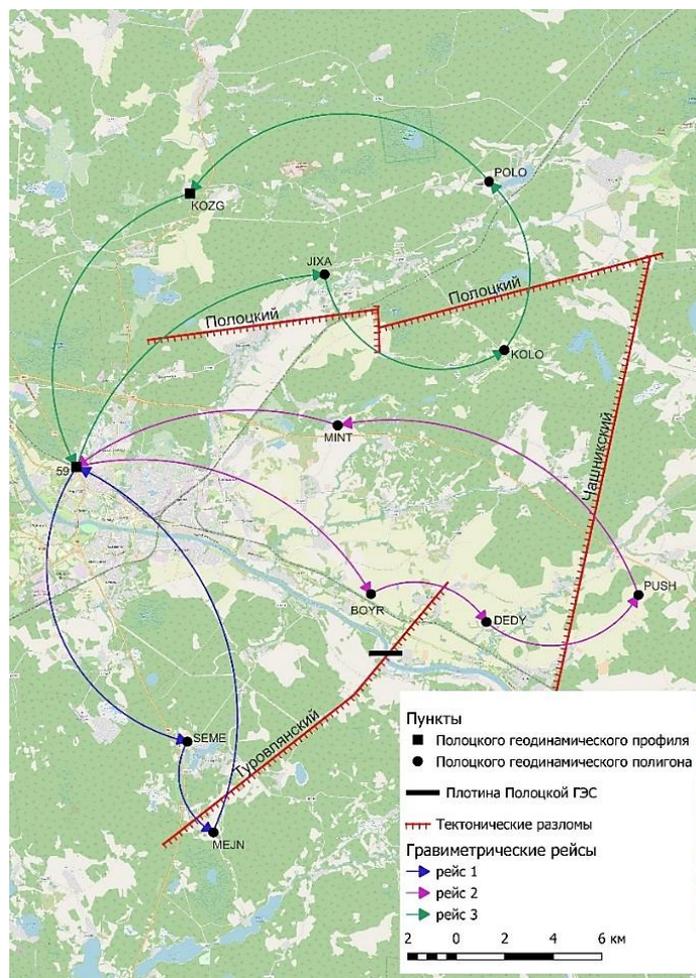


Рисунок 6. – Схема проложения гравиметрических рейсов по пунктам ГДП «Полоцкая ГЭС»

Выполнение измерений на ГДП выполнялось в ясную погоду. В связи с конструктивной невозможностью установки гравиметра непосредственно на пункты ГДП гравиметр устанавливался рядом с пунктами на специальную отгоризонтированную подставку. Для приведения результатов измерений к центру каждого пункта ГДП определялось превышение между подставкой и пунктами. Приведение выполнялось с использованием значения вертикального градиента нормальной силы тяжести ( $-0,3086$  мГал/м). После установки и приведения гравиметра в рабочее положение на каждом пункте бралось по три отсчета по отсчетному устройству гравиметров. Процесс работы на пункте SEME (д. Семенец) представлен на рисунке 7.



**Рисунок 7. – Выполнение гравиметрических измерений на пункте SEME**

Обработка результатов полевых измерений включала введение поправки за смещение нуль-пункта в каждый из рейсов, расчет приращений ускорения силы тяжести относительно опорного пункта. Введение данной поправки позволяет привести все отсчеты в гравиметрическом рейсе к моменту времени взятия отсчета на опорном пункте (в нашем случае пункт № 59). Поправка за смещение нуль-пункта распределялась пропорционально времени продолжения рейсов. Осредненные результаты гравиметрических измерений относительно опорного гравиметрического пункта № 59 представлены в таблице 1. Схема площадного распределения поля силы тяжести относительно пункта № 59 представлена на рисунке 8.

**Таблица 1. – Результаты гравиметрических измерений, выполненных на ГДП «Полоцкая ГЭС» в 2024 году**

№ п/п	Название гравиметрических пунктов	Приращение поля (относительно пункта 59), мГал
1	59	0
2	SEME	-19,09
3	MEJN	-23,96
4	BOYR	-13,66
5	DEDY	-14,54
6	PUSH	-10,59
7	MINT	-2,59
8	JIXA	-6,34
9	KOLO	-8,95
10	POLO	-11,17
11	KOZG	-7,26

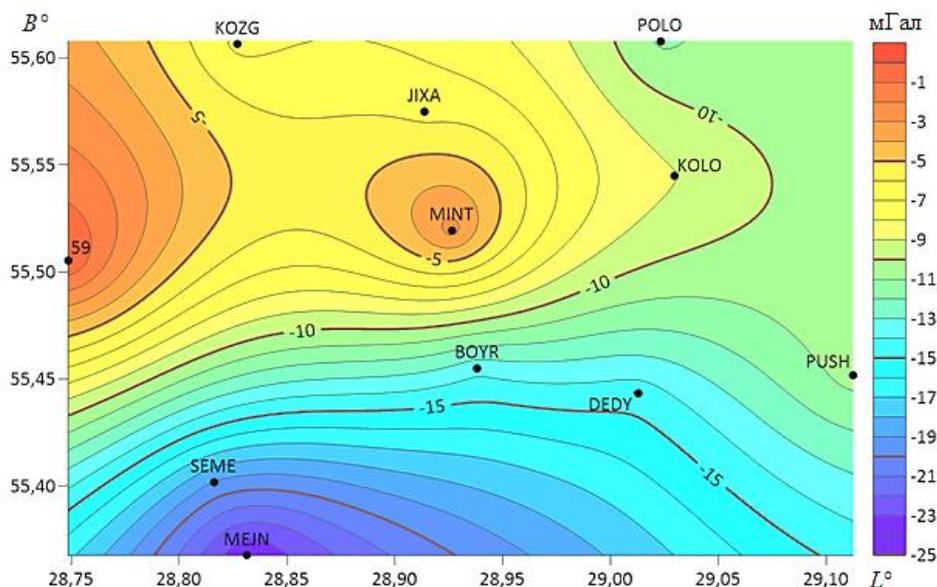


Рисунок 8. – Схема площадного распределения поля силы тяжести на исследуемой территории относительно пункта № 59

**Заключение.** Результаты измерений показали, что приращения ускорения силы тяжести на пунктах ГДП «Полоцкая ГЭС» варьируются в пределах от 0 до -23,96 мГал. Пункт ГДП № 59 имеет наибольшее значение ускорения силы тяжести. Максимальное приращение поля силы тяжести отмечается у пунктов MEJN и SEME, расположенных в южной части ГДП. Поле силы тяжести неоднородное, с резкими изменениями количественных значений в субмеридиональном направлении.

Так как цикл гравиметрических измерений, выполненных в 2024 году, является на данный момент единственным, то возможность вычислить вариации гравитационного поля на территории ГДП «Полоцкая ГЭС» отсутствует. В 2025 году в рамках ГБ-0921 «Оценка и моделирование влияния геодинамики и техногенеза на геоэкологические и инженерно-геологические процессы в пределах Беларуси по материалам современных геолого-геофизических и геодезических исследований» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.), НИР «Исследование современной геодинамики территории Республики Беларусь геодезическими методами» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.), ГБ 0524 «Разработка веб-ГИС-проекта «Геодинамика и техногенез Беларуси»» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.) запланировано выполнение повторного цикла гравиметрических измерений, несущего в себе информацию о краткосрочных вариациях поля силы тяжести.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сашурин А.Д., Кашкаров А.А., Копырин В.В. Геофизические исследования земной коры при оценке аварийности Краснотурьинского участка многониточного газопровода // Горная геофизика: междунар. конф. / Санкт-Петербург (22–25 июня 1998 г.). – СПб.: ВНИМИ, 1998. – С. 329–333.
2. Колмогорова П.П., Каратаев Г.И. Прогнозирование скоростей современных вертикальных движений земной коры с помощью корреляционной модели по статическим геолого-геофизическим данным // Методические вопросы исследования современных движений земной коры. – Новосибирск, 1975. – С. 182–203.
3. Вопросы теории и постановка наблюдений временных возмущений гравитационного и магнитного полей и движений земной поверхности в аспекте современных глубинных процессов / Э.Э. Фотиади, Г.И. Каратаев, В.Г. Коломогоров и др. // Проблемы современных движений земной коры. – 1969. – С. 527–536.
4. К вопросу о соотношениях между скоростями современных вертикальных движений земной коры, геофизическими полями и геоструктурными элементами / А.Т. Донабедев, В.А. Сидоров, К.В. Тимарев и др. // Докл. АН СССР. – 1960. – Т. 132. – № 4. – С. 810–813.
5. Кузнецова В.Г. Использование геофизических данных для составления карты современных вертикальных движений Земной коры западной части Украины // Современные движения Земной коры. – 1973. – № 5. – С. 94–100.
6. Огородова Л.В., Шимбирев Б.П., Юзефович А.П. Гравиметрия. – М.: Недра, 1978. – 325 с.
7. Отражение современных глубинных тектонофизических процессов в динамике гравитационного и магнитного полей Беларуси. Статья 1. Структура мониторинговой геофизической сети и непривлинные вариации во времени поля силы тяжести / А. Сас-Ухрыновски, С. Мрочек, Г.И. Каратаев и др. // Литосфера. – 2001. – № 1(14). – С. 120–130.

#### REFERENCES

1. Sashurin, A.D., Kashkarov, A.A. & Kopyrin, V.V. (1998). Geofizicheskie issledovaniya zemnoi kory pri otsenke aviariiynosti Krasnotur'inskogo uchastka mnogonitochnogo gazoprovoda. *Gornaya geofizika: mezhdunar. konf. / Sankt-Peterburg (22–25 iyunya 1998 g.)* (329–333). Saint-Petersburg: VNIIMI. (In Russ.).

2. Kolmogorova, P.P. & Karataev, G.I. (1975). Prognozirovaniye skorostei sovremennykh vertikal'nykh dvizhenii zemnoi kory s pomoshch'yu korrelyatsionnoi modeli po staticheskim geologo-geofizicheskim dannym. *Metodicheskie voprosy issledovaniya sovremennykh dvizhenii zemnoi kory* (182–203). Novosibirsk. (In Russ.).
3. Fotiadi, E.E., Karataev, G.I., Kolmogorov, V.G., Cheremisin, V.G. & Shcheglov, V.I. (1969). Voprosy teorii i postanovka nablyudenii vremennykh vozmushchenii gravitatsionnogo i magnitnogo polei i dvizhenii zemnoi poverkhnosti v aspekte sovremennykh glubinykh protsessov. *Problemy sovremennykh dvizhenii zemnoi kory* (527–536). (In Russ.).
4. Donabedov, A.T., Sidorov, V.A., Timarev, K.V. & Torkhovskaya, L.N. (1960). K voprosu o sootnosheniyakh mezhdru skorostyami sovremennykh vertikal'nykh dvizhenii zemnoi kory, geofizicheskimi polyami i geostrukturnymi elementami. *Dokl. AN SSSR*, 132(4), 810–813. (In Russ.).
5. Kuznetsova, V.G. (1973). Ispol'zovanie geofizicheskikh dannykh dlya sostavleniya karty sovremennykh vertikal'nykh dvizhenii Zemnoi kory zapadnoi chasti Ukrainy. *Sovremennye dvizheniya Zemnoi kory*, (5), 94–100. (In Russ.).
6. Ogorodova, L.V., Shimbirev, B.P. & Yuzefovich, A.P. (1978). *Gravimetriya*. Moscow: Nedra. (In Russ.).
7. Sas-Ukhrynovski, A., Mrochek, S., Karataev, G.I., Belov, Yu.V. & Karagodina, O.I. (2001). Otrazhenie sovremennykh glubinykh tektonofizicheskikh protsessov v dinamike gravitatsionnogo i magnitnogo polei Belarusi. Stat'ya 1. Struktura monitoringovoi geofizicheskoi seti i neprilivnye variatsii vo vremeni polya sily tyazhesti. *Litosfera*, 1(14), 120–130. (In Russ.).

Поступила 19.11.2024

## IMPLEMENTATION OF GRAVIMETRIC MEASUREMENTS AT THE GEODYNAMIC SITE "POLOTSKAYA HYDROELECTRIC POWER STATION"

**K. MARKOVICH, V. YALTYHOV, P. DOLHI**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*The article presents information on tectonic faults and faults located in the area of the Polotsk hydroelectric power plant. Information is given on previously performed geodynamic studies on the territory of the geodynamic polygon "Polotsk hydroelectric power station". The process of implementation is described and the results of field gravimetric measurements in 2024 at the points of the geodynamic polygon are presented. A diagram of the areal distribution of the gravity field on the territory of the geodynamic polygon "Polotsk hydroelectric power station" is constructed.*

**Keywords:** gravimetric measurements, geodynamic testing ground, gravimeter, vertical gradient of normal gravity, variations in the gravitational field.

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 504.5:66 2.998

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-88-91

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
АЭРОЗОЛЯМИ ИСКУССТВЕННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОЛОКОН НА СОСТОЯНИЕ ЗДОРОВЬЯ  
РАБОТАЮЩИХ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ РАБОТА.А. ЗУЕВА<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА<sup>2)</sup><sup>1)</sup> Филиал «Новополоцкое управление ОАО «Белтеплоизоляция»»,<sup>2)</sup> Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)<sup>2)</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5025-7419>

Выполнена оценка как априорной, так и апостериорной составляющих профессионального риска для изолировщиков на термоизоляции, вдыхающих загрязненный аэрозолями искусственных минеральных волокон воздух при выполнении работ по тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. Определено, что априорный уровень профессионального риска изолировщиков на термоизоляции при выполнении теплоизоляционных работ по пылевому фактору варьируется от среднего (существенного) до высокого (труднопереносимого) риска. Результаты исследований по апостериорной составляющей профессионального риска показали стабильно высокие его уровни для исследуемой профессии, что обуславливает необходимость разработки современных действенных мер по минимизации воздействия мелкодисперсной пыли минеральной и стеклянной ваты на здоровье работников при выполнении теплоизоляционных работ, чтобы снизить риск развития производственно обусловленных и профессиональных заболеваний.

**Ключевые слова:** загрязнение окружающей среды, профессиональный риск, изолировщик на термоизоляции, минеральная вата, стеклянная вата.

**Введение.** Снижение нагрузки на окружающую среду, обеспечение безопасных и безвредных условий труда является в настоящее время актуальной и социально значимой проблемой современного общества [1; 2]. По статистическим данным Международной организации труда ежегодно в мире регистрируется более 160 случаев профессиональных заболеваний, при этом от заболеваний, связанных с производством, погибает в 6,5 раз больше работников, чем от производственных травм [3]. Анализ причин летальных случаев, связанных с работой, показал, что наибольшую долю составляют заболевания системы кровообращения (более 30% всех случаев) и новообразования (более 26%), а заболевания органов дыхания занимают третье ранговое место (более 17%). Значительная часть профессиональных заболеваний органов дыхания обусловлена воздействием производственной пыли, раздражающее действие которой провоцирует развитие хронической обструктивной болезни легких, хронического ринофарингита и хронического пылевого бронхита; фиброгенное действие – пневмокониоза; аллергическое действие – профессиональной бронхиальной астмы и экзогенного аллергического альвеолита; а канцерогенное действие приводит к развитию мезотелиомы плевры и профессиональных опухолей легких.

В связи ограничением в большинстве стран мира использования асбеста существенно возросла роль неорганических теплоизоляционных материалов, таких, как минеральная и стеклянная вата, и изделий на их основе. В частности, в Республики Беларусь объем производства подобных теплоизоляционных материалов за последние десять лет вырос практически на 300% [4]. Вместе с тем, влияние загрязнения окружающей среды пылью минеральной и стеклянной ваты и ее воздействие на работников при выполнении теплоизоляционных работ изучено недостаточно, что и определило цель настоящего исследования.

**Методы исследований.** Исследования по гигиенической оценке условий труда в экспонированной группе выполнены в рамках аттестации рабочих мест, проводимой на белорусском предприятии, осуществляющем теплоизоляционные работы, в период с 2019 по 2024 год. Диагностику заболеваний осуществляли в соответствии с международной классификацией болезней, на основании анализа листков нетрудоспособности с учетом принадлежности к исследуемым группам. Выкопировка проводилась за трехлетний период с 2021 по 2023 год (экспонированная группа – изолировщики на термоизоляции оборудования и трубопроводов; группа контроля – работники вспомогательных производств: жестянщики, сборщики изделий и конструкций, профессиональная деятельность которых не связана с воздействием пыли минеральной и стеклянной ваты, характерных для экспонированной группы). Математическую обработку выполняли с помощью общепринятых методов вариационной статистики.

**Результаты и их обсуждение.** Инструментальный замер при помощи аспиратора ПУ-4Э загрязнения пылью воздуха рабочей зоны изолировщиков на термоизоляции оборудования и трубопроводов пакетами прошивными теплоизоляционными показал, что усредненная концентрация пыли минеральной ваты варьируется в пределах от 7,20 до 16,55 мг/м<sup>3</sup> при значении ПДК<sub>р.з.</sub> в 4 мг/м<sup>3</sup> (т.е. регистрируется регулярное превышение ПДК<sub>р.з.</sub> в 1,8–4,1 раза).

Таким образом, априорный уровень профессионального риска в соответствии с гигиенической классификацией условий труда изолировщиков на термоизоляции оборудования и трубопроводов по пылевому фактору варьируется от среднего (существенного) до высокого (труднопереносимого) риска.

Типовой химический состав пыли при выполнении теплоизоляционных работ следующий [5]:

а) при использовании минеральной ваты: 43–50% масс.  $\text{SiO}_2$ ; 10–25% масс.  $\text{CaO}$ ; 6–15% масс.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 6–16% масс.  $\text{MgO}$ ; 3–8% масс.  $\text{FeO}$ ; 1–3,5% масс.  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 0,5–3,5% масс.  $\text{TiO}_2$ ; 0,5–2% масс.  $\text{K}_2\text{O}$ ; менее 1% масс.  $\text{B}_2\text{O}_3$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$ ;

б) при использовании стеклянной ваты: 55–70% масс.  $\text{SiO}_2$ ; 13–18% масс.  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 5–13% масс.  $\text{CaO}$ ; до 12% масс.  $\text{B}_2\text{O}_3$ ; до 7% масс.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; до 5% масс.  $\text{MgO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; до 3% масс.  $\text{BaO}$ ; до 2,5% масс.  $\text{K}_2\text{O}$ ; до 1,5% масс.  $\text{F}_2$ ; до 0,5% масс.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  и  $\text{Li}_2\text{O}$ .

Пыль минеральной ваты относится к мелкодисперсному типу с размером частиц не более 10 мкм и скоростью осаждения в воздухе не более 1 см/с, характеризуется плохой всасываемостью в организме и возможностью длительно витать в воздухе рабочей зоны. Характерное для пыли минеральной и стеклянной ваты высокое содержание свободного диоксида кремния определяет повышенный уровень профессионального риска по фиброгенному эффекту для изолировщиков на термоизоляции оборудования и трубопроводов при длительном воздействии пылевого фактора. Пыль минеральной ваты может оказывать токсичное действие на клетки кровеносного русла организма, сердечно-сосудистой, органов дыхания, пищеварения, легочной систем, а также вызвать механическое раздражающее действие на верхние дыхательные пути, слизистую оболочку глаз и кожу [6; 7].

Выполнена апостериорная оценка уровня профессионального риска для изолировщика на термоизоляции оборудования и трубопроводов (экспонированная группа) и группы контроля (работники вспомогательных производств: жестянщики, сборщики изделий и конструкций) по показателям заболеваемости с временной утратой трудоспособности (ЗВУТ) белорусского предприятия, осуществляющего теплоизоляционные работы, за период с 2021–2023 гг. по методическим рекомендациям, приведенным в [8].

Определено, что наиболее уязвимая возрастная группа наблюдения – от 30 до 49 лет, при этом не установлен рост ЗВУТ в зависимости от стажа работы. В таблице 1 приведены основные показатели ЗВУТ в экспонированной группе и в группе контроля. Установлено, что в экспонированной группе (222,41±1,69 случаев) по сравнению с группой контроля (136,66±1,32 случаев) достоверно выше число случаев ЗВУТ на 100 работающих, показатель дней временной нетрудоспособности (2458,62±5,6 дней и 1763±4,77 дней соответственно) и показатель болевших лиц (89,65±1,11 и 83,33±1,72 соответственно), а индекс здоровья напротив выше в группе контроля (16,66, к 10,34).

Таблица 1. – Основные показатели ЗВУТ в экспонированной группе и в группе контроля

Показатель	Значение показателя ЗВУТ	
	экспонированная группа	группа контроля
Случаи ЗВУТ на 100 работающих	222,41±1,69	136,66±1,32
Болевшие лица	89,65±1,11	83,33±1,72
Средняя длительность одного случая	11,05	12,90
Дни временной нетрудоспособности	2458,62±5,6	1763±4,77
Показатель неболевших лиц (индекс здоровья)	10,34	16,66

Важным является не только анализ обобщенных показателей ЗВУТ, но и трудовые потери по отдельным нозологическим формам. Распределение числа случаев ЗВУТ и дней временной нетрудоспособности по отдельным нозологическим формам в исследуемых группах представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

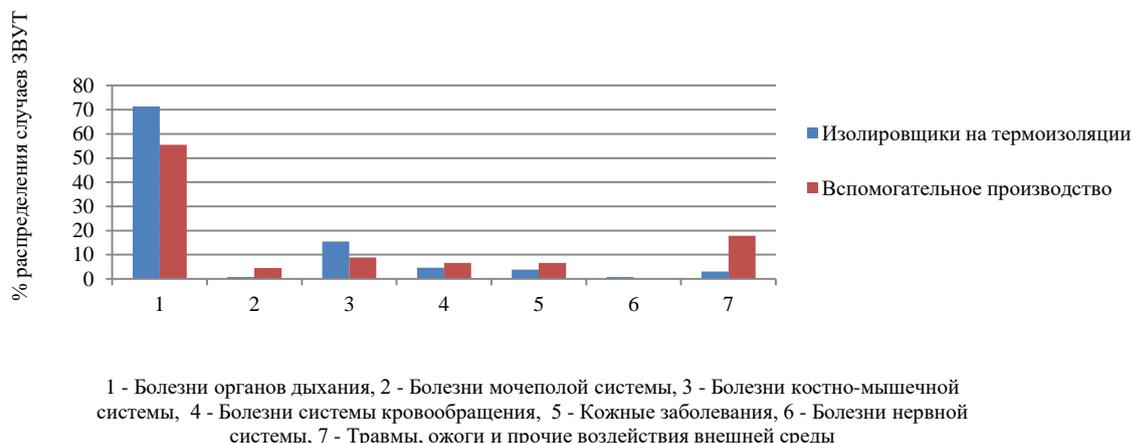
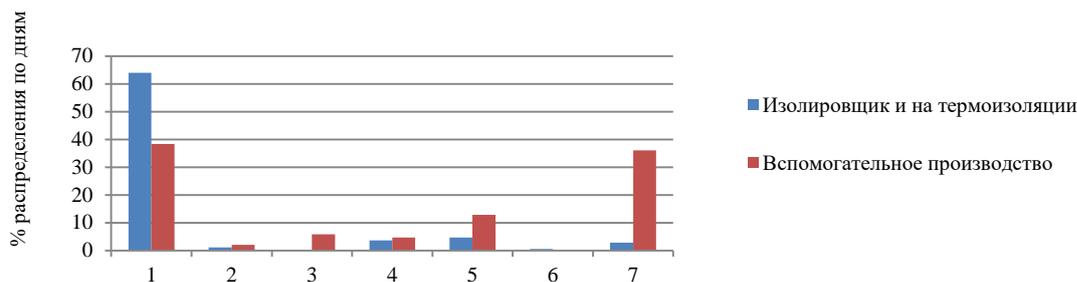


Рисунок 1. – Процент распределения случаев ЗВУТ по отдельным нозологическим формам



1 - Болезни органов дыхания, 2 - Болезни мочеполовой системы, 3 - Болезни костно-мышечной системы, 4 - Болезни системы кровообращения, 5 - Кожные заболевания, 6 - Болезни нервной системы, 7 - Травмы, ожоги и прочие воздействия внешней среды

**Рисунок 2. – Процент распределения по дням временной нетрудоспособности по отдельным нозологическим формам**

Определено, что среди изолировщиков на термоизоляции оборудования и трубопроводов наиболее высока вероятность развития заболеваний органов дыхания, а также дольше продолжительность восстановления после болезней органов дыхания, чем в группе контроля (среди работников вспомогательных производств), что может быть обусловлено высоким уровнем загрязнения окружающей среды пылью минеральной и стеклянной ваты. В целом, уровень показателя ЗВУТ по всем болезням для изолировщиков на термоизоляции оборудования и трубопроводов по шкале Е.Л. Ноткина оценивается как «очень высокий» [8].

Для определения влияния загрязнения окружающей среды аэрозолями искусственных минеральных волокон на состояние здоровья изолировщиков на термоизоляции оборудования и трубопроводов при выполнении теплоизоляционных работ использовали также показатель относительного риска (ОР), определяемый как отношение показателя заболеваемости (ПЗ) в экспонированной группе к аналогичному показателю в группе контроля:

$$ОР = ПЗ_{э} / ПЗ_{гк},$$

где  $ПЗ_{э}$  – показатель заболеваемости в экспонированной группе (число случаев ЗВУТ, болевших лиц, дней на 100 работающих) в основной группе;

$ПЗ_{гк}$  – показатель заболеваемости в группе контроле (число случаев ЗВУТ, болевших лиц, дней на 100 работающих).

Исходя из результатов исследований, уровень относительного риска по показателям ЗВУТ у изолировщиков на термоизоляции оборудования и трубопроводов статистически достоверно выше, чем в группе контроля, среди работников вспомогательного производства. Выполнен расчет этиологической доли (ЭД), характеризующий степень причинно-следственной связи заболеваемости с условиями труда, по формуле:

$$ЭД = [(ОР - 1) / ОР] \cdot 100,$$

где ЭД – этиологическая доля, %;

ОР – значение относительный риск.

Определено, что показатель этиологической доли, устанавливающий степень причинно-следственной связи условий труда и заболеваемости, у изолировщиков на термоизоляции составляет 32,43%, что подтверждает высокую степень производственной обусловленности и может спровоцировать возникновение стойких нарушений и развитие производственно обусловленных заболеваний.

**Заключение.** Таким образом, результаты оценки как априорной, так и апостериорной составляющих профессионального риска для изолировщиков на термоизоляции оборудования и трубопроводов показали стабильно высокие его уровни, что обуславливает необходимость разработки современных действенных мер по минимизации загрязнения воздуха пылью минеральной и стеклянной ваты, чтобы снизить риск развития производственно обусловленных и профессиональных заболеваний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зуева А.А., Булавка Ю.А. Гигиеническая оценка условий труда изолировщика на термоизоляции с учетом пылевого фактора // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XVII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых / Минск (18 апр. 2024 г.). – Минск: УГЗ, 2024. – С. 71–73.
2. Булавка Ю.А., Самусевич В.Н. Использование цифровых инструментов интегрированных решений в области охраны труда // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 11. – С. 72–81.

3. Зуева А.А., Булавка Ю.А. Идентификация опасностей на рабочем месте изолировщика на термоизоляции с применением контрольного листа для наблюдений и собеседований // Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве: сб. материалов X Междунар. заоч. науч.-практ. конф. / Минск (22 дек. 2023 г.). – Минск: УГЗ, 2024. – С. 107–111.
4. Гутич Е.А., Косыченко Г.Е., Сычик С.И. Особенности заболеваемости и оценка профессионального риска здоровью работников, имеющих контакт с аэрозолями искусственных минеральных волокон // Анализ риска здоровью. – № 4. – 2019. – С. 113–118. DOI: 10.21668/health.risk/2019.4.12.
5. Brown R.C., Harrison P.T.C. Alkaline earth silicate wools – A new generation of high temperature insulation // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. – 2012. – Vol. 64, iss. 2. – P. 296–304. DOI: 10.1016/j.yrtph.2012.08.020.
6. Гигиеническая оценка условий труда в отдельных профессиях строительных организаций / О.И. Копытнкова, З.Ш. Турсунов, А.В. Леванчук и др. // Гигиена и санитария. – 2018. – № 97(12). – С. 1203–1209.
7. Копытнкова О.И., Леванчук А.В., Турсунов З.Ш. Оценка риска ущерба для здоровья при воздействии мелкодисперсной пыли минеральной ваты // Казан. мед. журнал. Гигиена труда. – 2014. – № 95(4). – С. 570–574. DOI: 10.17816/KMJ1846.
8. Куренкова Г.В., Жукова Е.В. Углубленный анализ заболеваемости с временной утратой трудоспособности работников промышленного предприятия. – Иркутск: ИГМУ, 2020. – 65 с.

## REFERENCES

1. Zueva, A.A. & Bulavka, Yu.A. (2024). Gigienicheskaya otsenka uslovii truda izolirovshchika na termoizolyatsii s uchedom pylevogo faktora [Hygienic Assessment of Working Conditions of an Insulation Worker at Thermal Insulation, Considering the DUST factor]. *Obespechenie bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: problemy i perspektivy: sb. materialov XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh / Minsk (18 apr. 2024 g.)* (71–73). Minsk: UGZ. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Bulavka, Yu.A. & Samusevich, V.N. (2019). Ispol'zovanie tsifrovyykh instrumentov integrirovannykh reshenii v oblasti okhrany truda [Use of Digital Tools for Integrated Solutions in the Sphere of Labor Protection]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. B, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences]*, (11), 72–81. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Zueva, A.A. & Bulavka, Yu.A. (2024). Identifikatsiya opasnostei na rabochem meste izolirovshchika na termoizolyatsii s primeneniem kontrol'nogo lista dlya nablyudeniya i sobesedovaniya. *Problemy obespecheniya bezopasnosti lyudei pri pozhare i vzryve: sb. materialov Mezhdunar. zaoch. nauch.-prakt. konf. / Minsk (22 dek. 2023 g.)* (107–111). Minsk: UGZ. (In Russ.).
4. Gutich, E.A., Kosyachenko, G.E. & Sychik, S.I. (2019). Osobennosti zabolevaemosti i otsenka professional'nogo riska zdorov'yu rabotnikov, imeyushchikh kontakt s aerorozolami iskusstvennykh mineral'nykh volokon [Peculiarities of Morbidity and Assessment of Occupational Health Risks for Workers Who Contact Aerosols of Man-Made Mineral Fibers]. *Analiz riska zdorov'yu [Health Risk Analysis]*, (4), 113–118. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.21668/health.risk/2019.4.12.
5. Brown, R.C. & Harrison, P.T.C. (2012). Alkaline earth silicate wools – A new generation of high temperature insulation. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 64(2), 296–304. DOI: 10.1016/j.yrtph.2012.08.020.
6. Kopytenkova, O.I., Tursunov, Z.Sh., Levanchuk, A.V., Mironenko, O.V., Frolova, N. M. & Sazonova, A.M. (2018). Gigienicheskaya otsenka uslovii truda v otdel'nykh professiyakh stroitel'nykh organizatsii [The Hygienic Assessment of Working Environment in Individual Occupations in Building Organizations]. *Gigiena i sanitariya [Hygiene and Sanitation]*, 97(12), 1203–1209. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Kopytenkova, O.I., Levanchuk, A.V. & Tursunov, Z.Sh. (2014). Otsenka riska ushcherba dlya zdorov'ya pri vozdeystvii melkdispersnoi pyli mineral'noi vaty [Assessment of Health Damage Due to Exposure to Mineral Wool Dust]. *Kazan. med. zhurnal. Gigiena truda [Kazan Medical Journal. Occupational Hygiene]*, 95(4), 570–574. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.17816/KMJ1846.
8. Kurenkova, G.V. & Zhukova, E.V. (2020). *Uglublennyy analiz zabolevaemosti s vremennoi utratoy trudospobnosti rabotnikov promyshlennogo predpriyatiya*. Irkutsk: IGMU. (In Russ.).

Поступила 26.11.2024

## ANALYSIS OF THE IMPACT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION BY ARTIFICIAL MINERAL FIBERS AEROSOLS ON THE HEALTH OF WORKERS WHEN PERFORMING HEAT INSULATION WORKS

H. ZUYEVA<sup>1)</sup>, Y. BULAUKA<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Branch "Novopolotsk Directorate of JSC "BELTEPLOIZOLYATSIA",

<sup>2)</sup> Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

An assessment of both the a priori and a posteriori components of professional risk for thermal insulation workers inhaling air contaminated with aerosols of artificial mineral fibers when performing work on thermal insulation of equipment and pipelines was performed. It was determined that the a priori level of professional risk for thermal insulation workers when performing thermal insulation work for the dust factor varies from medium (significant) to high (hard to bear) risk. The results of studies on the posteriori component of professional risk showed consistently high levels for the profession under study, which necessitates the development of modern effective measures to minimize the impact of fine dust of mineral and glass wool on the health of workers when performing thermal insulation work in order to reduce the risk of developing work-related and occupational diseases.

**Keywords:** environmental pollution, professional risk, thermal insulation worker, mineral wool, glass wool.

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Зафатаев В.А., Королёва Т.И.</i> Численный метод термозкономической оптимизации вентиляционных установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа .....	2
<i>Кравченко В.В.</i> Критерии порога перколяции твердой фазы в дискретных моделях микроструктуры цементного камня .....	13
<i>Кравченко В.В.</i> Моделирование распределения влаги в поровой среде цементного камня в раннем возрасте .....	18
<i>Лазаренко О.В., Кругликова М.Л.</i> Реновация детских садов постройки 60–90-х годов прошлого столетия в Республике Беларусь .....	25
<i>Повколас К.Э., Шавловская О.А.</i> Оценка эффективности конструкции вертикального барьера в виде открытой траншеи с креплением стенок для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде .....	33
<i>Тур А.В.</i> Методология проверок живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, основанная на концепции «performance based design (PBD)». Часть 1 .....	40
<i>Тур А.В.</i> Методология проверок живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, основанная на концепции «performance based design (PBD)». Часть 2 .....	50
<i>Ющенко В.Д., Велюго Е.С., Козицын Т.В.</i> Влияние степени аэрации воды на удаление марганца при обработке воды сложного состава в напорных фильтрах с различными загрузками .....	58
<i>Ягубкин А.Н., Бакатович А.А.</i> Влияние химических добавок на свойства стеновых блоков из пшеничной соломы .....	63

### ГЕОДЕЗИЯ

<i>Дегтярев А.М., Иваши́нџа А.С.</i> Использование расширенной модели метода наименьших квадратов для поиска грубых ошибок в ряде многократных измерений .....	74
<i>Маркович К.И., Ялтыхов В.В., Долгий П.С.</i> Выполнение гравиметрических измерений на геодинатическом полигоне «Полоцкая ГЭС» .....	80

### ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Зуева А.А., Булавка Ю.А.</i> Анализ влияния загрязнения окружающей среды аэрозолями искусственных минеральных волокон на состояние здоровья работающих при выполнении теплоизоляционных работ .....	88
--	----