

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 628.33:621.3

DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-2-10

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ Г. ВИТЕБСКА
НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ****А.В. ГАЛУЗО***(Витебский областной комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды)***д-р техн. наук В.Н. ШТЕПА***(Полесский государственный университет, Пинск)***канд. техн. наук В.Д. ЮЩЕНКО***(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Проанализирована актуальность внедрения современных подходов повышения эффективности работы очистных сооружений канализации. Выполнено функциональное моделирование биологической очистки сточных вод с использованием методологии IDEF0, что позволило выделить номенклатуру входящих и управляющих факторов, механизмы и результаты выполнения соответствующих технологических процессов. Построена структурная схема потоков информации в разрезе контроля очистных сооружений. Выполнен корреляционный анализ взаимосвязей параметров качества сточных вод, сделаны экспертные выводы, позволившие обобщать дальнейшее использование нейронных сетей для моделирования процессов очистки водных растворов. На аналитической платформе Deductor построена нейромодель для прогноза функционирования биологических очистных сооружений с возможностью её интеграции в более высокие иерархические уровни цифровых систем городского водоотведения.

Ключевые слова: биологические очистные сооружения, функциональное моделирование, контроль, прогнозирование, корреляционный анализ, нейронные сети.

Введение. В процессе использования воды на коммунальные, промышленные и сельскохозяйственные нужды происходит её загрязнение разнообразными минеральными, органическими и химическими веществами.

Недостаточно очищенные сточные воды (СВ), попадая в окружающую среду, загрязняют природную воду, снижают способность водных объектов к естественному самоочищению и способствуют развитию процесса эвтрофикации, которая, в свою очередь, ведет к нарушению качества водной среды, снижая привлекательность и конкурентоспособность всего региона.

Снижение антропогенной нагрузки на водные объекты с сохранением водных ресурсов является одной из важных целей международного значения, она обозначена в Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 22 февраля 2022 г. № 91.

Основные требования по охране и использованию водных объектов установлены Водным кодексом Республики Беларусь, Законом Республики Беларусь от 26 ноября 1992 г. № 1982-ХІІ «Об охране окружающей среды», Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 26 мая 2017 г. № 16 «О нормативах допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод».

С точки зрения функциональности канализационных очистных сооружений (КОС), результатом их эксплуатации является обеспечение выполнений нормативных требований относительно качества сбрасываемых СВ [1].

При этом, с учётом режима водоотведения и состава сточных вод населённых пунктов, для выполнения такой задачи необходимо проводить оперативный контроль работы очистных сооружений. Под термином «контроль» имеется ввиду система мероприятий, направленных на мониторинг и подтверждение соответствия процессов очистки СВ установленным нормативным, технико-технологическим и экономическим требованиям на всех этапах жизненного цикла КОС, и это является обязательным для обеспечения экологической безопасности. Особенно важен функциональный и структурный анализ в контексте работы биологических очистных сооружений (БОС).

Объект исследования. В качестве объекта принят блок биологической очистки «первичный отстойник – зонированный аэротенк – вторичный отстойник» канализационных очистных сооружений г. Витебска. На КОС поступает смесь хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод, их количество и состав подвергается постоянному изменению в соответствии с экономической ситуацией в республике и в настоящее время составляет порядка 75–90 тыс. м³/сут.

В зависимости от поступления и состава сточных вод, КОС неоднократно перестраивались, реконструировались и расширялись. Проектная производительность очистных сооружений в целом составляет 120 тыс. м³/сут, но отдельные сооружения могут суммарно обработать до 160 тыс. м³/сут сточных вод¹. Конечной точкой очистки сточных вод является их сброс в р. Западная Двина с требуемыми нормативными концентрациями по регламентируемым загрязнителям.

За 2022 год средние показатели сточных вод, поступающих на КОС, составляют: ХПК – 773,5 мг/дм³, БПК₅ – 315 мг/дм³, азот общий – 71,8 мг/дм³, фосфор общий – 5,5 мг/дм³.

Методика проведения работы. Для формализации задачи контроля процесса очистки сточных вод изначально выполнено функциональное моделирование с использованием методологии IDEF0². Такой стандарт представляет собой объект в виде набора модулей, описание которых выглядит как «чёрный ящик» с входами, выходами, управлением и механизмом, который постепенно детализируется до необходимого уровня. Концепт методологии IDEF0 содержится в рекомендациях Р50.1.028-2001³, где также отображаются все сигналы управления, которые на DFD (диаграмме потоков данных) не демонстрировались. Данная модель используется при организации процессов и проектов, основанных на моделировании как административных, так и организационных компонентов.

На основе технологического анализа канализационных очистных сооружений г. Витебска выбраны следующие категории параметров (согласно терминологии IDEF0) (рисунок 1):

- *входящие факторы* (данные поступают от измерительных средств, экспертных оценок и лабораторного анализа): качество СВ на входе в очистные сооружения, расход СВ, состояние оборудования;
- *управляющие факторы*: нормативные требования к качеству СВ перед сбросом в окружающую среду, стоимость ресурсов, паспортные характеристики оборудования и процессов;
- *механизмы*: технологическое оборудование;
- *результаты*: эффективность и ресурсозатратность системы.



Рисунок 1. – Контекстная диаграмма контроля эффективности блока биологических очистных сооружений

Проведя функциональную декомпозицию (разделение) первого уровня путем раскрытия контекстной диаграммы (см. рисунок 1) и компонентов блока биологической очистки, произведем детализацию процесса контроля работы и эффективности (рисунок 2) как формирование структуры информационных потоков технологических элементов.

На основе обобщения функционального моделирования и структуры информационных потоков была сформирована схема системы контроля эффективности БОС г. Витебска (рисунок 3). Необходимо отметить, что с учётом инерционности биологических процессов (необходимости значительного времени для перевода их параметров в новый рабочий режим), такая система должна включать и возможность упреждающего прогнозирования состояния процессов, в зависимости от показателей качества СВ, что трансформирует её в «систему контроля

¹ Ющенко В.Д., Куприянич Т.С., Галузо А.В. Особенности изменения количества и состава сточных вод, поступающих на очистные сооружения г. Витебска: сб. материалов IV-й МНПК «Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания» / Брест (25–27 сент. 2013 г.). – С. 132–135.

² Information Integration for Concurrent Engineering (ICE) Compendium Of Methods Report [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cs.tcd.ie/Andrew.Butterfield/Teaching/CS4098/IDEF/IDEFcompendium.pdf>.

³ Р.50.1.031–2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Ч. 1. Стадии жизненного цикла продукции : рекомендации по стандартизации. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 32 с.

и прогнозирования» (СКП). При этом она интегрируется в данном случае в существующие SCADA-решения как отдельный информационно-аналитический модуль, получающий данные от аккредитованной лаборатории и экспертных заключений технологов КОС, причем для аккумуляирования и упрощения обмена информацией идёт накопление в базе данных с перспективным изменением последней в базу знаний.

В рамках проведенных исследований рассматривается вариант построения СКП блока БОС «единый чёрный ящик». Данный вариант актуален с точки зрения уменьшения материальных затрат на фиксацию показателей СВ, когда есть только два блока данных: «вход на первичные отстойники – выход из вторичных отстойников» (без учёта изменения (промежуточных) показателей качества СВ на отдельных внутренних элементах БОС).

Оценка эффективности очистки сточных вод блока БОС была принята согласно выражению:

$$\mathcal{E}_{оч} = (C_{исх} - C_{кон}) \cdot 100 / C_{исх}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{оч}$ – эффективность очистки сточных вод, %;

$C_{исх}$ и $C_{кон}$ – содержание загрязняющих веществ соответственно до и после очистки сточных вод.

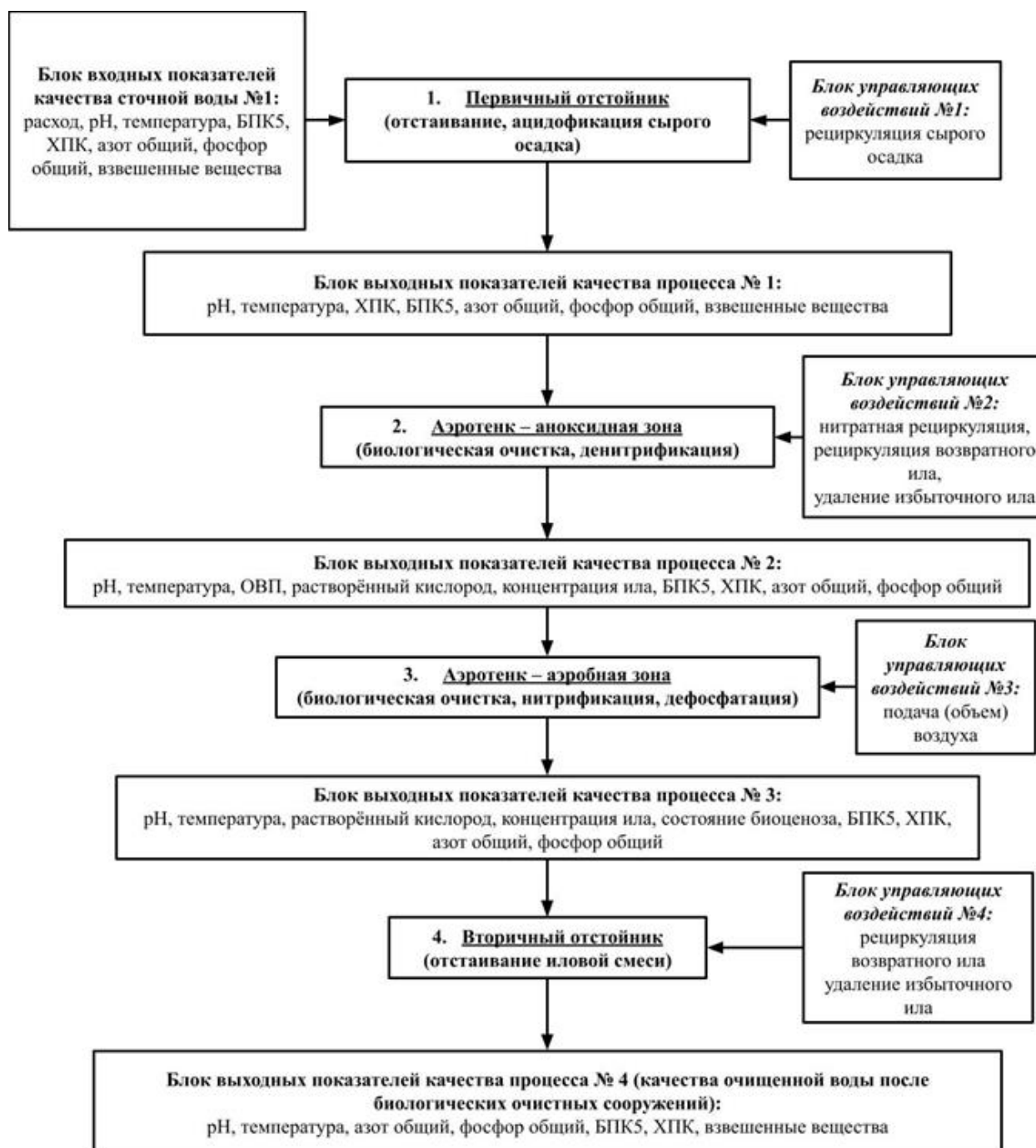


Рисунок 2. – Структура информационных потоков технологических элементов блока БОС г. Витебска



Рисунок 3. – Схема системы контроля и прогнозирования эффективности БОС г. Витебска

Анализ результатов функционирования блока биологических очистных сооружений. В ходе проведения исследования для построения СКП БОС были использованы статистические лабораторные и тестовые данные состава СВ по работе элементов блока БОС действующих канализационных очистных сооружений г. Витебска.

Для обработки приняты исходные данные за 2022 год и текущий период 2023 года, полученные в результате исследований СВ аккредитованной лаборатории предприятия (БПК₅, ХПК, фосфор общий, азот общий, взвешенные вещества), показаний средств измерения, установленных на технологических трубопроводах (расход СВ, объем воздуха и рециркуляции иловой смеси), показаний стационарно установленных измерительных систем с набором датчиков для определения pH, температуры, концентрации кислорода и концентрации ила. Состояние активного ила оценивалось по результатам микробиологических исследований отобранных образцов экспертами аккредитованной лаборатории предприятия.

При этом для получения достоверных данных некоторые параметры функционирования системы были заданы в ходе изучения процессов биологической очистки в двухкоридорных зонированных аэротенках (процент рециркуляции, интенсивность аэрации, доза ила и т.д.).

Статистический анализ полученных данных был выполнен на аналитической платформе *Deductor*, которая является основой для создания прикладных решений. Реализованные в ней технологии позволяют на базе единой архитектуры пройти этапы построения аналитической системы: от создания хранилища данных до автоматического подбора моделей и визуализации полученных результатов. Этот пакет предоставляет инструментальные средства, необходимые для решения аналитических задач: отчетность, прогнозирование, сегментация, поиск закономерностей, а также другие задачи, где применяются аналогичные методики анализа, например, *OLAP*, *Knowledge Discovery in Databases* и *Data Mining*. Также *Deductor* является хорошей платформой для создания систем поддержки принятия решений.

На предварительном этапе создания системы контроля и прогнозирования биологических очистных сооружений г. Витебска с целью поискового анализа выполнили корреляционное исследование с использованием критерия Пирсона – метод параметрической статистики, позволяющий определить наличие или отсутствие линейной связи между двумя количественными показателями, а также оценить ее тесноту и статистическую значимость. Критерий позволяет определить, изменяется ли (возрастает или уменьшается) один показатель в ответ на изменения другого. В статистических расчетах и выводах коэффициент корреляции обычно обозначается как r_{xy} или R_{xy} .

Расчет коэффициента корреляции Пирсона производится по следующей формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum (d_x \times d_y)}{\sqrt{(\sum d_x^2 \times \sum d_y^2)}}. \quad (2)$$

Значения коэффициента корреляции Пирсона интерпретируются исходя из его абсолютных значений. Возможные значения коэффициента корреляции варьируют от 0 до 1. Чем больше абсолютное значение r_{xy} – тем выше теснота связи между двумя величинами. $r_{xy} = 0$ говорит о полном отсутствии связи. $r_{xy} = +1$ свидетельствует о наличии абсолютной (функциональной) связи.

Для оценки тесноты, или силы, корреляционной связи обычно используют общепринятые критерии по таблице Чеддока⁴, согласно которой абсолютные значения $r_{xy} < 0,3$ свидетельствуют о слабой связи, значения $r_{xy} 0,3–0,7$ – о связи средней тесноты, значения $r_{xy} > 0,7$ – о сильной связи.

Оценка статистической значимости коэффициента корреляции r_{xy} осуществляется при помощи t_r – критерия, рассчитываемого по следующей формуле:

$$t_r = \frac{r_{xy}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}. \quad (3)$$

Полученное значение t_r сравнивается с критическим значением при определенном уровне значимости и числе степеней свободы $n-2$. Если t_r превышает $t_{крит}$, то делается вывод о статистической значимости выявленной корреляционной связи.

По результатам корреляционных исследований построения СКП БОС «единый чёрный ящик» наблюдаются слабые линейные связи (менее 0,3), отражающие взаимосвязь между загрязняющими веществами исходя из их природы и влияния внешних факторов.

Например, наблюдается корреляционная связь между взвешенными веществами, БПК (0,118), ХПК (0,134) и фосфором общим (0,176). Данная связь объясняется тем, что через показатели БПК и ХПК выражают содержание органических веществ в сточных водах. Органические вещества в основном содержат примерно по 1/3 растворимых, коллоидных и взвешенных частиц [2].

В сточных водах фосфор встречается частично в виде органически связанного фосфора и частично в виде неорганического фосфора в форме полифосфатов и ортофосфатов. Органический фосфор, главным образом, связан также с взвешенными частицами. Температура и pH влияют на процесс аммонификации в сточных водах. Аммонификация – это бактериальное превращение органических соединений азота в неорганические формы гетеротрофными гнилостными бактериями в канализационной сети. Кроме аммиака в результате аммонификации образуется фосфор и сероводород. Результатом неудовлетворительной аммонификации в сети канализации является неэффективный процесс нитрификации в сооружениях биологической очистки. Поступающие со сточными водами белковые соединения разлагаются в анаэробных зонах с образованием аммонийного азота, и как следствие – повышенные концентрации в очищенных водах на выпуске очистных сооружений.

Температура влияет на физические свойства воды, на большинство протекающих в воде химических реакций и на процессы, связанные с жизнедеятельностью активного ила. В диапазоне температур 20–30 °C наблюдается изменчивость плотности воды, а следовательно, и растворимости загрязняющих веществ в сточных водах. Скорость осаждения взвешенных частиц и снижения БПК обратно пропорциональна вязкости и плотности воды [3].

В летний период успешнее протекают процессы не только окисления углеродсодержащих органических загрязнений, но и нитрификации и денитрификации.

Следует отметить линейную связь между показателями расход сточных вод и температура (0,29), обусловленную жизнедеятельностью населенного пункта (потребление горячей воды, периоды года) и инфильтрацией.

Оценка статистической обработки данных функционирования БОС г. Витебска (согласно корреляционным зависимостям) демонстрирует очень весомую нелинейность процессов:

- отсутствие высоких линейных связей;
- единичное количество заметных связей;
- небольшое количество умеренных связей.

⁴ См. сноску 2.

В целом, линейные связи между технологическими параметрами незначительны, что в совокупности с неперiodичностью и нестационарностью процессов требует использования математического аппарата, способного обрабатывать такие наборы данных. Для решения поставленной задачи возможно и обосновано использование нейронных сетей.

Нейросетевое моделирование процессов биологической очистки сточных вод г. Витебска. В качестве базовой нейросетевой архитектуры использовался многослойный персептрон, где основным вычислительным элементом такой многослойной нейронной сети (МНС) является формальный нейрон, который выполняет параметрическое нелинейное преобразование входного вектора в скалярную величину y [4].

Нейроны образуют сеть, характеризующуюся следующими параметрами и свойствами:

M – число слоев сети;

N_μ – число нейронов μ -го слоя, где связи между ними в слое отсутствуют.

Выходы нейронов μ -го слоя ($\mu = 1, 2, \dots, n, M - 1$) поступают на входы нейронов только следующего $\mu+1$ слоя. Внешний векторный сигнал x поступает на входы нейронов только первого слоя, выходы нейронов последнего слоя M образуют вектор выходов сети $y(M)$. Типовая структура сети показана на рисунке 4 [4].

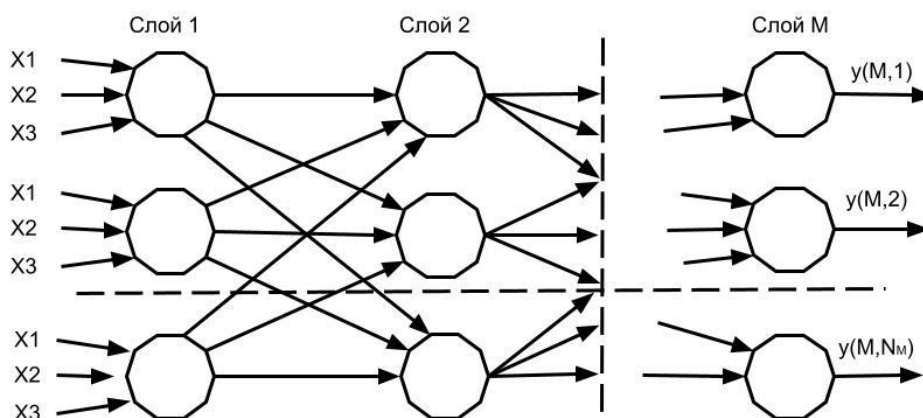


Рисунок 4. – Типовая архитектура многослойного персептрона⁵

Каждый μ -й нейрон для i -го слоя превращает входной вектор $x(\mu, i)$ в исходную скалярную величину $y(\mu, i)$. Это преобразование состоит из двух этапов: сначала вычисляется дискриминантная функция $net(\mu, i)$, которая далее превращается в исходную величину $y(\mu, i)$. Дискриминантная функция представляет собой отрезок многомерного ряда Тейлора. Коэффициенты разложения отрезка многомерного ряда Тейлора образуют вектор весовых коэффициентов $w(\mu, i)$ или память нейрона.

Дискриминантная функция нейрона имеет вид:

$$net(\mu, i) = w_0(\mu, i) + \sum_{j=1}^N W_j^{(\mu, i)} X_j^{(\mu, i)}, \quad (4)$$

где $w(\mu, i) = (w_0(\mu, i);$

$w_1(\mu, i), \dots, w_N(\mu, i))T$ – вектор весовых коэффициентов нейрона;

$x_j(\mu, i)$ – j -я компонента N -мерного входного вектора $x(\mu, i)$.

Нелинейное преобразование $y(\mu, i) = \psi(net(\mu, i))$ задается функцией активации, являющейся монотонной и ограниченной. В частности, при положительных или нулевых выходах нейрона такой функцией может быть сигмоидная функция $\psi(x) = 1/(1+e^{-x})$. Обозначим через $y(\mu) = (y(\mu, 1), y(\mu, 2), \dots, y(\mu, N_\mu))T$ вектор выхода нейронов μ -го слоя. Процесс обучения сети осуществляется в результате минимизации целевой функции – некоторого критерия качества $F(w)$, характеризующего интегральную меру близости выходов сети $y(M)(k)$ и указаний учителя $y^*(k)$:

$$F(w) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k Q(\varepsilon(w, m)), \quad (5)$$

где k – номер текущего цикла обучения нейросетей (НС);

$m = 1, 2, \dots, k-1$ – номера предыдущих циклов обучения НС;

W – сложенный вектор-столбец весовых коэффициентов сети, который составляют векторы-столбцы $W(\mu) = (W(\mu, 1)T, W(\mu, 2)T, \dots, W(N_\mu)T)T$, $\mu = M, M-1, \dots, 1$ каждого слоя.

Мгновенный критерий качества $Q(\varepsilon(W, k))$, входящий в интегральный критерий качества $F(W)$, зависит от вектора ошибки сети $Q(\varepsilon(W, m))$: $\varepsilon(W, m) = y(M)(m) - y^*(m)$.

Для каждого входящего вектора x из обучающего множества должен быть определен вектор желаемых выходов сети y^* .

⁵ См. сноску 3.

Если обучающаяся МНС используется как классификатор, то обычно желаемые выходы имеют низкий уровень (0 или менее 0,1), кроме выхода узла, соответствующего классу, к которому относится x ; этот выход в данном случае имеет высокий уровень (1 или более 0,9). Градиентные методы обучения МНС основаны на использовании градиента целевой функции $F(w)$. Эти способы носят итеративный характер, так как составляющие градиента оказываются нелинейными функциями. Все далее рассмотренные методы основаны на итерационной процедуре, реализуемой в соответствии с формулой:

$$W_{k+1} = W_k + \alpha_k s(W_k), \quad (6)$$

где W_k, W_{k+1} – текущее и новое приближение значений весов и порогов НС к оптимальному решению соответственно;

α_k – шаг сходимости;

$s(W_k)$ – направление поиска в N -мерном пространстве весов.

Способ определения $s(W_k)$ и α_k каждой итерации зависит от особенностей конкретного метода.

Обобщенный градиентный алгоритм по отношению к задаче обучения МНС имеет следующий вид.

Шаг 1. Инициализация: задаются параметры МНС: N – число входов, M – число слоев, начальные веса и пороги w . Задаются параметры алгоритма обучения: максимально допустимое число циклов обучения *Epochs*, параметр сходимости алгоритма ε_1 – цель обучения (в качестве нее обычно выступает максимально допустимая среднеквадратичная ошибка), ε_2 – параметр сходимости вдоль прямой (для простоты будем считать их равными величинами).

Шаг 2. Положить счетчик итераций $k = 0$.

Шаг 3. Вычислить компоненты: $\frac{\partial Q(\varepsilon(W_{k-1}, k))}{\partial W}$.

Шаг 4. Выполняется ли равенство $\left\| \frac{\partial Q(\varepsilon(W_{k-1}, k))}{\partial W} \right\| \leq \varepsilon_1$? Если да, то сходимость достигнута нужно перейти к шагу 13, если нет, то перейти к шагу 5.

Шаг 5. Выполняется ли неравенство $k > Epochs$? Если да, то достигнуто максимальное число циклов обучения, сходимость не достигнута, нужно перейти к шагу 13, если нет, то перейти к шагу 6.

Шаг 6. Вычислить $s(W_k)$.

Шаг 7. Выполняется ли неравенство $\frac{\partial Q(\varepsilon(W_{k-1}, k))}{\partial W} s(W_k) < 0$? Если да, то нужно перейти к шагу 9, если нет, то принять: $S(W_k) = -\frac{\partial Q(\varepsilon(W_{k-1}, k))}{\partial W}$.

Шаг 8. Найти такое значение α_k , при котором $F(W_k + \alpha_k s(W_k))_{\min}$, используя параметр ε_2 .

Шаг 9. Положить $w_{k+1} = w_k + \alpha_k s(w_k)$.

Шаг 10. Выполняется ли неравенство $F(w_{k+1}) < F(w_k)$? Если да, то нужно перейти к шагу 11, если нет, то перейти к шагу 13.

Шаг 11. Выполняется ли неравенство $\frac{\|\Delta w\|}{\|w_k\|} \leq \varepsilon_1$? Если да, то имеем окончание поиска и нужно перейти к шагу 13, если нет, то перейти к шагу 12.

Шаг 12. Положить $k = k + 1$ и перейти на шаг 3.

Шаг 13. Остановка.

Структурно нейронная сеть состоит из двух основных элементов: функции активации – преобразования входного сигнала нейрона в выходной, и функции ошибки, которая вычисляет точность выдаваемого результата и показывает качество обученной нейронной сети. С учётом необходимости усиления слабых сигналов в области нуля и ослабления сильных сигналов в области больших значений аргумента в качестве функции активации использован арктангенс, который описывал функционирование нейрона сети отображением:

$$y_i = \arctg \left(\sum_{j=1}^{N_{in}} x_j w_{ij} \right), \quad (7)$$

где y_i – выходной сигнал i -го нейрона;

x_j – входные сигналы от других нейронов, находящихся на предыдущем слое;

w_{ij} – веса межнейронных связей.

С использованием аналитических зависимостей (2)–(7) в платформе *Deductor* создана нейросетевая модель согласно концепции «единого чёрного ящика» (рисунок 5). Глубина обучающей выборки составила 72 комплексных набора данных. Отдельно необходимо отметить, что получение даже одного полного примера такой выборки – крайне непростая научно-организационная задача, в рамках которой задействуются порядка десяти разнопрофильных, в том числе высококвалифицированных специалистов; время её формирования – до 5 суток при сложной подготовительной работе на технологической линии БОС, в аккредитованной лаборатории, в отделе контрольно-измерительных приборов и автоматизации.

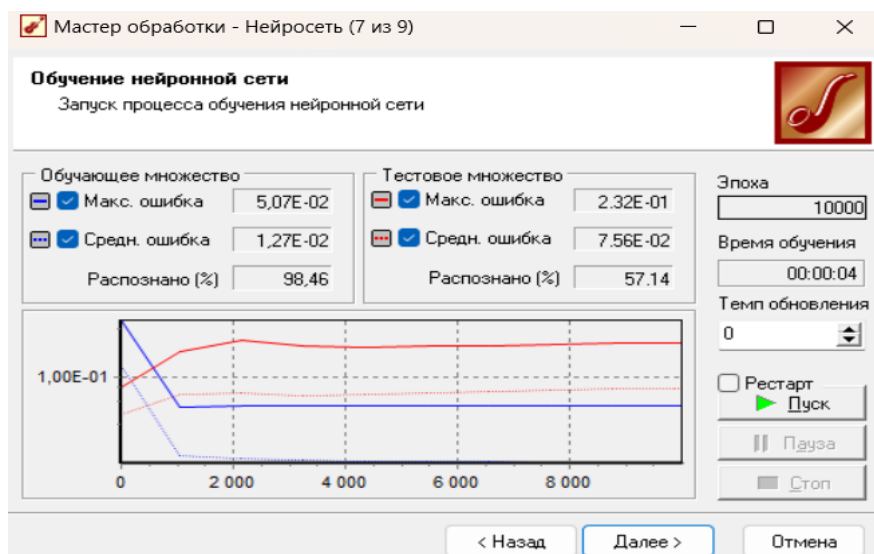


Рисунок 5. – Интерфейс модуля создания нейросетевой модели (многослойного перцептрона), блока БОС г. Витебска, согласно концепции «единого чёрного ящика» в платформе Deductor

Качество синтеза многослойного перцептрона (см. рисунок 5) составило (при 10000 итерационных эпохах) на обучающей выборке – 98,46%, на тестовой выборке – 57,14%; оно в целом приемлемо. Однако такие результаты демонстрируют необходимость дальнейших исследований, нацеленных на проверку наличия «переобучения» МНС и декомпозицию технологической схемы, с точки зрения объектов моделирования, на: первичный отстойник, аноксидную зону, оксидную зону, вторичный отстойник. При этом критически важно наполнение (расширение) обучающих наборов данных, что позволит увеличить их репрезентативность и повысить гибкость (адаптивность) нейросетевого прогнозирования.

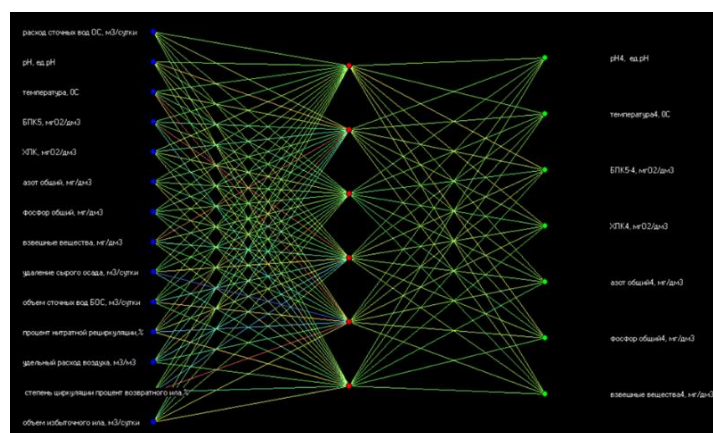


Рисунок 6. – Архитектура многослойного перцептрона, моделирующего БОС г. Витебска, согласно концепции «единого чёрного ящика» в платформе Deductor

Заключение. Проведен функциональный и структурный анализ контроля биологических очистных сооружений «первичный отстойник – зонированный аэротенк – вторичный отстойник», в ходе которого решены следующие задачи:

- выполнено функциональное моделирование с использованием методологии IDEF0;
- определены входящие и управляющие факторы, механизмы и результаты соответствующих технологических процессов;
- построена структурная схема потоков информации в разрезе контроля очистных сооружений;
- выполнен корреляционный анализ взаимосвязей параметров качества сточных вод.

Полученные результаты исследований указывают на целесообразность и обоснованность использования нейронных сетей для моделирования и прогнозирования процессов очистки сточных вод.

В рамках дальнейших исследований необходимо:

- создать четыре модели нейронных сетей, которые формируют ассоциацию моделей, пошагово описывающих технологические процессы на БОС г. Витебска: первичный отстойник, аэротенк-аноксидная зона, аэротенк-аэробная зона, вторичный отстойник;

- провести анализ максимальной и средней ошибки синтеза МНС «единого чёрного ящика» и среднеарифметические значения максимальной и средней ошибки синтеза 4-х МНС последовательных технологических блоков для соответствующих обучающих и тестовых выборок данных;
- провести анализ точности распознавания данных при синтезе МНС «единого чёрного ящика» и расчет среднеарифметических значений процентов точности распознавания данных синтеза 4-х МНС последовательных технологических блоков для соответствующих обучающих и тестовых выборок;
- проводить системную работу по дальнейшему наполнению обучающих для МНС выборок данных.

После выявления более высокого качества нейросетевого моделирования необходимо разрабатывать программное обеспечение и формировать интерфейсные решения для контроля экологической безопасности БОС и эффективного управления технологическими процессами [5; 6] с его интеграцией в единое информационное поле «Цифровой водоканал города».

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаршунов В.А. Очистка сточных вод и утилизация их отходов: пособие. – Минск: Мисанта, 2020. – 642 с.
2. Очистка сточных вод, биологические и химические процессы: [пер. с англ.] / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен и др. – М.: Мир, 2009. – 480 с.
3. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод в сооружениях с аэротенками. – М.: Акварос, 2003. – 512 с.
4. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.
5. Штепа В.Н., Заец Н.А., Алексеевский Д.Г. Адаптивные решения интеллектуального управления очистными сооружениями // Новые методы и технологии в водоснабжении и водоотведении: сб. тр. / под общ. ред. В.О. Китикова. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 281–287.
6. Alekseevsky D.G., Chernysh Ye.Yu., Shtepa V.N. Formalization of the Task of Creating a Mathematical Model of Combined Wastewater Treatment Processes // Journal of Engineering Sciences. – 2021. – Vol. 8, Iss. 2. – P. H1–H7. DOI: 10.21272/jes.2021.8(2).h1.

REFERENCES

1. Sharshunov, V.A. (2020). *Ochistka stochnykh vod i utilizatsiya ikh otkhodov: posobie*. Minsk: Misanta. (In Russ.).
2. Khentse, M., Armoes, P., Lya-Kur-Yansen, I. & Arvan, E. (2009). *Ochistka stochnykh vod, biologicheskie i khimicheskie protsessy*. Moscow: Mir. (In Russ.).
3. Zhmur, N.S. (2003). *Tekhnologicheskie i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod v sooruzheniyakh s aerotenkami*. Moscow: Akvaros. (In Russ.).
4. Kruglov, V.V. & Borisov, V.V. (2002). *Iskusstvennye neironnye seti. Teoriya i praktika*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom. (In Russ.).
5. Shtepa, V.N., Zaets, N.A. & Alekseevskii, D.G. (2022). Adaptivnye resheniya intellektual'nogo upravleniya ochistnymi sooruzheniyami. In V.O. Kitikov (Eds.). *Novye metody i tekhnologii v vodosnabzhenii i vodoотводении: sb. tr.* (281–287). Minsk: BGTU. (In Russ.).
6. Alekseevsky, D.G., Chernysh, Ye.Yu. & Shtepa, V.N. (2021). Formalization of the Task of Creating a Mathematical Model of Combined Wastewater Treatment Processes. *Journal of Engineering Sciences*, 8(2), H1–H7. DOI: 10.21272/jes.2021.8(2).h1.

Поступила 20.11.2023

DEVELOPMENT OF CONTROL AND FORECASTING SYSTEM FOR THE EFFECTIVE FUNCTIONING OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS IN THE CITY OF VITEBSK BASED ON NEURAL NETWORKS

A. HALUZA

(Vitebsk Regional Committee of Natural Resources and Environmental Protection)

V. SHTEPA

(Polessky State University, Pinsk)

V. YUSHENKO

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The relevance of implementing modern approaches to improving the efficiency of sewage treatment facilities has been analyzed. Functional modeling of biological wastewater treatment has been performed using the IDEF0 methodology. It has allowed the identification of the nomenclature of input and control factors, mechanisms, and the results of corresponding technological processes. A block diagram of information flows in the context of control of wastewater treatment facilities is constructed. Correlation analysis of the relationships between wastewater quality parameters has been conducted, and expert opinions have justified the further use of neural networks for modeling the processes of purification of aqueous solutions. Neural model has been built on the Deductor analytical platform for forecasting the functioning of biological wastewater treatment plants.

Keywords: biological wastewater treatment plants, functional modeling, control, forecasting, correlation analysis, neural networks.

УДК 621.644.07:66.042.945

DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-11-20

МЕСТО ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ СТАЛЬНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

д-р техн. наук, проф. В.Н. РОМАНИЮК

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Н.В. СТРУЦКИЙ

(ГПО «Белтонгаз», Минск)

В статье рассмотрен вопрос места и роли изоляционных покрытий в обеспечении надежности стальных подземных газопроводов. Показано, что изоляция является основным, базовым средством защиты от коррозии. Предложена модель надежности линейного участка стального подземного газопровода как сложной технической системы, состоящей из неравноценных элементов: стальной трубы как основного элемента, определяющего работоспособное/неработоспособное состояние системы, и вспомогательных, защитных элементов – изоляции и электрохимической защиты, снижающих уровень коррозионного воздействия грунта на основной элемент. Это повышает степень подобия надежностной модели реальному техническому объекту, а также позволяет выстроить иерархическую структуру неисправностей различных элементов с учетом их влияния на общее техническое состояние газопровода. Предлагается в качестве определяющего физического параметра защитного покрытия рассматривать его целостность, степень сохранения (потери) целостности и наступление предельного состояния изоляции оценивать по количеству (плотности) дефектов.

Ключевые слова: *газораспределительная сеть, подземный стальной газопровод, система с неравноценными элементами, изоляционное покрытие, надежность, дефект, отказ.*

Введение. Внешней средой для стального подземного газопровода служит почва (грунт), являющаяся весьма сложной и изменчивой (динамической) физико-химико-биологической системой [1], оказывающей на трубопровод целый комплекс воздействий. Соответственно, необходимость компенсации влияющих факторов среды в их различных сочетаниях требует применения сопутствующих защитных устройств и влечет усложнение конструктива трубопровода.

Исходя из опыта эксплуатации, фактором, обладающим наибольшим потенциалом влияния на техническое состояние стальных подземных распределительных газопроводов, является коррозионный фактор. Коррозионные процессы носят глобальный характер, оказывая на участки газораспределительной сети повсеместное и непрерывное по времени (хотя и с изменяющейся интенсивностью) воздействие.

Для компенсации глобального коррозионного фактора стальные подземные трубопроводы оснащаются специальными антикоррозионными средствами, главными из которых являются изолирующие покрытия (ИП) и электрохимическая защита (ЭХЗ).

Следует отметить две важные особенности изоляции: во-первых, ИП функционирует в нерегулируемом, «пассивном», режиме (почему традиционно и определяется как «пассивная защита»), во-вторых, его состояние непосредственно влияет на режим работы ЭХЗ. Более того, состояние изоляции по сути определяет общую техническую и экономическую состоятельность комплексной защиты от коррозии в целом, так как его ухудшение имеет следствием необходимость повышения защитных токов (и соответствующего увеличения затрат электрической энергии). Невозможность обеспечить такое повышение наличными средствами ЭХЗ, в свою очередь, требует их модернизации, то есть дополнительных материальных вложений в объект.

Учитывая прикладную важность тематики, вопросы изучения эксплуатационных свойств, оценки технического состояния, методов контроля и диагностирования антикоррозионных защитных покрытий стальных подземных трубопроводов и, в частности, газопроводов относятся к актуальным и достаточно хорошо проработаны, тем более что исторически ИП является наиболее ранним по времени внедрения в производственную практику средством защиты от коррозии.

Вместе с тем, в кругу традиционно рассматриваемых в указанном контексте вопросов в меньшей степени освещен вопрос определения места защитного покрытия в общей модели надежности стального трубопровода, с учетом способа действия изоляции и специфики ее связей с другими элементами. Это снижает качество предлагаемых (или подразумеваемых) надежностных моделей и результативность их применения. Соответственно, роль ИП либо недооценивается, что может привести к необоснованному ослаблению режима эксплуатационного контроля и ремонтных работ, либо, наоборот, преувеличивается, когда повреждения изоляции учитываются и рассматриваются наравне с коррозионными повреждениями металла трубы, вследствие чего прогнозируемый срок службы газопровода искусственно занижается.

Данный методологический пробел затрудняет практическое использование полученных при отдельных исследованиях изоляции результатов (включая данные эксплуатационной статистики), их масштабирование на крупные трубопроводные системы, такие как, например, газораспределительная система Республики Беларусь, и требует соответствующего решения.

Нормативные требования к средствам защиты от коррозии. Общие требования к защите от коррозии наружной поверхности подземных стальных сооружений, выполненных из углеродистых и низколегированных сталей, в том числе распределительных газопроводов, устанавливаются межгосударственным стандартом ГОСТ 9.602¹.

Указанным документом применение средств электрохимической защиты предусматривается для подземных стальных сооружений, расположенных в грунтах средней и высокой коррозионной агрессивности и биоагрессивных грунтах, в зонах опасного действия блуждающих постоянных и переменных токов.

Для оценки коррозионной агрессивности грунта по отношению к стали определяют удельное электрическое сопротивление грунта, измеренное в полевых или лабораторных условиях, и среднюю плотность катодного тока при смещении потенциала на 100 мВ отрицательней стационарного потенциала стали в грунте (таблица 1)².

Таблица 1. – Коррозионная агрессивность грунта по отношению к углеродистой и низколегированной стали

Коррозионная агрессивность грунта	Удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м	Средняя плотность катодного тока, А/м ²
Низкая	Св. 50	До 0,05 включительно
Средняя	Св. 20 до 50 включительно	Св. 0,05 до 0,20 включительно
Высокая	До 20 включительно	Св. 0,20

Применение защитных покрытий предусматривается независимо от коррозионной агрессивности грунта, для всех без исключения подземных сооружений в качестве основного метода защиты от коррозии.

ГОСТ 9.602 устанавливает для защитных покрытий ряд нормативных показателей (адгезия к стали и в местах нахлеста, прочность при ударе и разрыве, стойкость к растрескиванию под напряжением, сопротивление вдавливанию (пенетрация), переходное электрическое сопротивление и др.), а также требования к их конструкции.

Следует особо отметить, что поскольку коррозия стали является электрохимическим процессом, тормозящее влияние на нее может достигаться только внешними электрическими (или электромагнитными) полями, формируемыми ЭХЗ. Роль изоляции состоит в максимально возможном снижении площади оголенной поверхности стального трубопровода, прямо контактирующей с коррозионной агрессивной средой (так называемый контакт «труба-земля») [2; 3].

В этой связи одной из ключевых эксплуатационных характеристик изоляции является целостность покрытия, которая с течением времени нарушается под воздействием различных внешних и внутренних факторов. К основным эксплуатационным дефектам изоляции относятся продавливание твердыми включениями грунта, повреждения корнями растений, микротрещины, отслоение.

Целостность ИП контролируется в ходе периодического приборного обследования. Данный вид эксплуатационного контроля включает в себя выявление мест утечек газа и повреждений изоляционного покрытия приборными методами, без вскрытия трубопровода.

Периодическое приборное обследование газопроводов, как правило, проводится каждые 5 лет. Отдельные характерные участки (например, переходы через естественные и искусственные преграды) могут обследоваться чаще – 1 раз в 3 года или ежегодно.

Все выявленные дефекты изоляции подлежат обязательному устранению не позднее 1 месяца после обнаружения в застроенной части и зонах опасного влияния блуждающих токов, и не позднее 3 месяцев в остальных случаях³. Поскольку изоляция является внешним защитным элементом газопровода, не влияющим на транспортировку газа, ремонт дефектов не требует перерыва в работе газопровода.

Модель надежности линейного участка стального подземного газопровода. С учетом изложенного выше, в зависимости от агрессивности внешней среды и соответствующего ей конструктивного исполнения, типовой линейный участок стального подземного газопровода можно представить в виде технической системы из двух или трех элементов: вариант «труба-изоляция» и вариант «труба-изоляция-ЭХЗ». Принимая за условие равную прочность и коррозионную стойкость металла сварного соединения и основного металла трубы, на данном уровне рассмотрения будем считать стальную трубу за один элемент, не выделяя стык.

¹ ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Стандартинформ, 2016. – 87 с.

² См. сноску 1.

³ Правила обеспечения промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь. – Минск, 2017. – 218 с.

Наиболее распространенным способом визуального представления надежностной модели технической системы является построение структурной схемы надежности (или блок-схемы надежности – reliability block diagram, RBD).

Блок-схемы относятся к статическим моделям надежности, в рамках которых состояния системы определяются наборами работоспособных и неработоспособных элементов в определенный момент времени. Те элементы, отказ которых вызывает отказ системы, имеют в схеме последовательное соединение; элементы, отказ которых приводит лишь к увеличению вероятности отказа, соединяются параллельно. При параллельном соединении элементов отказ системы происходит лишь при совмещении отказов частей системы. По сути, блок-схема надежности представляет собой наглядную интерпретацию вероятностной задачи [4].

Приняв связь между трубой и защитной частью газопровода последовательной, а связь между ИП и ЭХЗ в составе комплексной защиты от коррозии параллельной, возможно получить варианты блок-схемы для стального подземного газопровода в различном конструктивном исполнении, показанные на рисунке 1.

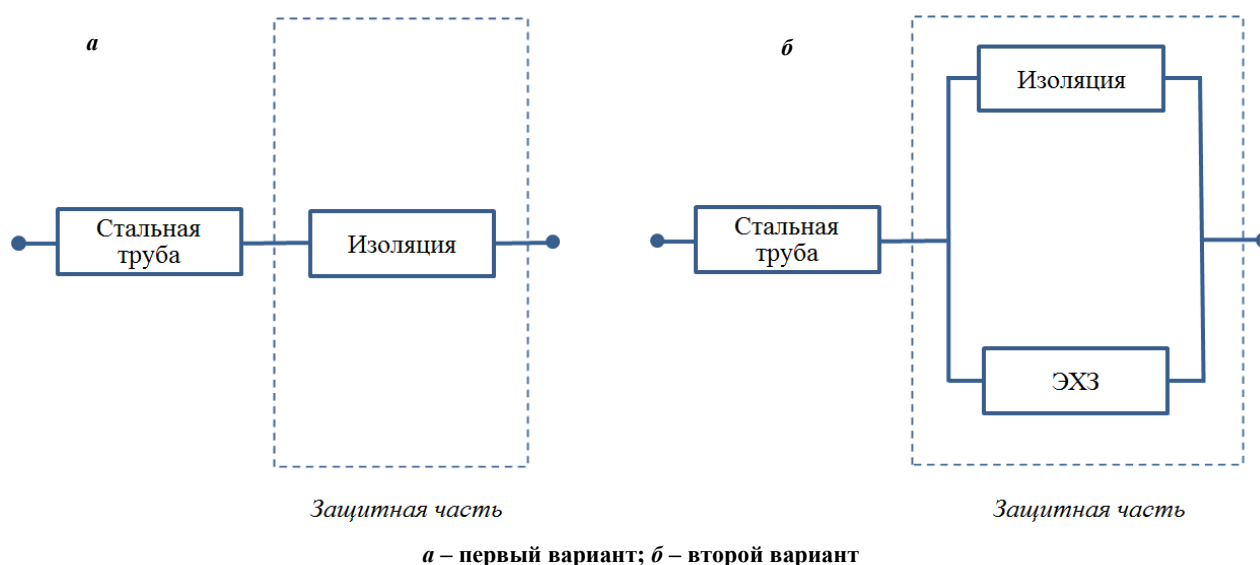


Рисунок 1. – Структурные схемы надежности стального подземного газопровода

Как видно из рисунка 1, в полной конфигурации системы ЭХЗ и изоляция являются взаимно резервирующими (дублирующими) элементами, выполняющими одну и ту же функцию различным способом. Действительно, теоретически (абстрагируясь от вопроса экономической эффективности активной защиты неизолированной трубы), находясь в состоянии полной работоспособности, каждый из этих элементов в отдельности может обеспечить защиту трубопровода от коррозии [5].

Подход к моделированию надежности линейного участка трубопровода методом структурных схем с объединением элементов в блоки по функциональному назначению нашел достаточно широкое применение и встречается, в частности, в ряде источников, посвященных вопросам надежности линейной части магистральных нефте- и газопроводов [6–10]. В целом, с некоторыми оговорками (авторы настоящей статьи не считают необходимым расширение модели трубопровода за счет включения в нее элементов эксплуатационной среды), предлагаемые схемы соответствуют указанному подходу.

Подобные представленным на рисунке 1 последовательные и параллельно-последовательные структуры позволяют, используя основные теоремы теории вероятности случайных событий и логико-вероятностные методы, осуществить прямой (непосредственный) расчет общей надежности технической системы по параметрам надежности элементов. Так, вероятность безопасной работы (ВБР) $P(t)$, то есть вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет, для линейного участка газопровода, не оснащенного активной защитой (см. рисунок 1, а), составит:

$$P(t) = P_{mp}(t) \cdot P_{из}(t), \quad (1)$$

для участка с комплексной защитой от коррозии (см. рисунок 1, б):

$$P(t) = P_{mp}(t) \cdot (P_{из}(t) + P_{эхз}(t) - P_{из}(t) \cdot P_{эхз}(t)), \quad (2)$$

где $P_{mp}(t)$, $P_{из}(t)$, $P_{эхз}(t)$ – соответственно ВБР трубы, изоляции и ЭХЗ.

Сам по себе метод структурных схем (блок-схем) надежности хорошо известен и документирован⁴, с его помощью определяются показатели надежности различных технических систем, в том числе, как уже указывалось выше, и трубопроводных. Достоинства метода – наглядность и удобство практического применения.

Вместе с тем, если говорить о стальной подземной трубопроводной коммуникации и газопроводе в частности, в действительности отношения между элементами системы, системой и внешней средой значительно сложнее, чем это может отразить непосредственный расчет последовательной или параллельно-последовательной схемы с помощью, например, выражений (1) и (2).

Дело в том, что элементы, составляющие линейные участки газопровода, имеют качественно различающиеся роли в обеспечении целевой функции. Находясь в работоспособном состоянии, труба сама по себе полностью обеспечивает нормальное функционирование системы (транспортировка продукта с заданными параметрами) с некоторым уровнем надежности. Именно герметичность и несущая способность (прочность) трубы определяют техническое состояние трубопровода в целом. В некотором смысле, это согласуется с известным определением основного элемента (ОЭ) [11; 12], в соответствии с которым ОЭ – элемент основной физической структуры системы, минимально необходимый для выполнения возложенных на нее задач.

Роль вспомогательных элементов (ВЭ) антикоррозийной защиты – снижение коррозионного воздействия («коррозионного давления») внешней среды на основной элемент, приведение его к уровню, приемлемому с точки зрения достижения необходимой надежности и долговечности системы. С учетом этого, сила итогового коррозионного воздействия $K_{ост}$ на трубу в конечном счете будет определяться двумя разнонаправленными составляющими:

- разрушительным коррозионным воздействием («давлением») среды, $K_{среды}(t)$;
- защитным воздействием антикоррозийной защиты, $З(t)$, складывающимся из воздействия пассивной составляющей, $З_{пасс}(t)$, либо пассивной и активной составляющих, $З_{пасс}(t)$ и $З_{акт}(t)$.

Или, если представить в виде соотношения:

$$K_{ост}(t) = K_{среды}(t) - З(t). \quad (3)$$

При этом, состав защитного блока прямо зависит от коррозионной агрессивности внешней среды: если показатели, характеризующие коррозионную агрессивность среды находятся в установленных пределах, то защита от коррозии осуществляется с помощью одного изолирующего покрытия, в противном случае предусматривается комплексная защита от коррозии.

Поскольку средства защиты не участвуют прямо в обеспечении целевой функции системы, тогда, вне зависимости от их числа и текущего состояния, отказом системы будет являться только отказ трубы. Действительно, образовавшийся дефект ИП или даже одновременный отказ активной и пассивной защиты не влечет немедленного и безусловного коррозионного разрушения трубы. Коррозионному повреждению всегда предшествует инкубационный период, продолжительность которого может широко варьироваться и зависит от ряда факторов. Вместе с тем, в любом случае, отказ средств антикоррозийной защиты существенно ухудшит надежность стального трубопровода: его ВБР снизится, а интенсивность отказов вырастет.

Если производить расчет без учета данной особенности стальных подземных трубопроводных систем, то полученная оценка системы будет включать в себя допущение о моментальном выходе из строя ОЭ вслед за ВЭ либо искусственное расширение понятия отказа системы за счет включения в него отказа ВЭ, что противоречит физическим связям и ролям элементов в системе. В таком случае модель теряет адекватность реальному объекту, и сами расчеты приобретают отвлекающий характер.

Таким образом, несмотря на небольшое количество элементов, линейный участок стального подземного газопровода следует отнести к сложным техническим системам, произведя соответствующую адаптацию модели, поставившись сохранить присущие методу структурных схем преимущества: удобство использования и наглядность.

Рассмотрим с этой точки зрения понятие технических систем с «последствием отказов», выделяемых в работах [13; 14]. Под последствием отказа здесь понимается ситуация, при которой отказ некоторого элемента влечет возрастание нагрузки на другой элемент системы, вследствие чего распределение времени до отказа второго элемента изменяется.

Исходя из данной логики, в частности, в работе В.В. Жаднова и С.Н. Полесского [15] решается задача расчета надежности радиоэлектронных комплексов, обладающих вспомогательными элементами (сервисными устройствами), снижающими диапазон внешних воздействий на основную аппаратуру.

Хотя стальной подземный трубопровод до настоящего времени не рассматривался как система с последствием отказов, однако это абсолютно логично вытекает из его физической структуры. Проанализируем в данном ключе вариант конструктивного исполнения стального подземного газопровода с антикоррозийным изоляционным покрытием, без средств электрохимической защиты.

⁴ ГОСТ Р 51901.14-2007. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и Булевы методы. – М.: Стандартинформ, 2008. – 23 с.

Итак, мы имеем систему из двух элементов: ОЭ и ВЭ. Когда в некоторый момент времени τ ВЭ отказывает, то ОЭ, будучи исправным до момента τ , проработает еще время $(t - \tau)$ со скачкообразным переходом на новый, более низкий уровень надежности (рисунок 2). Таким образом, в системе действительно возникает последствие, выражающееся в существенном (изменяющем характер процесса) запаздывании наступления ее конечного (неработоспособного) состояния. Вместе с тем, поскольку данная особенность системы обусловлена кардинально различающимися ролями основного и вспомогательных элементов, с точки зрения надежности точнее будет определить ее как «систему с неравноценными элементами» [5].

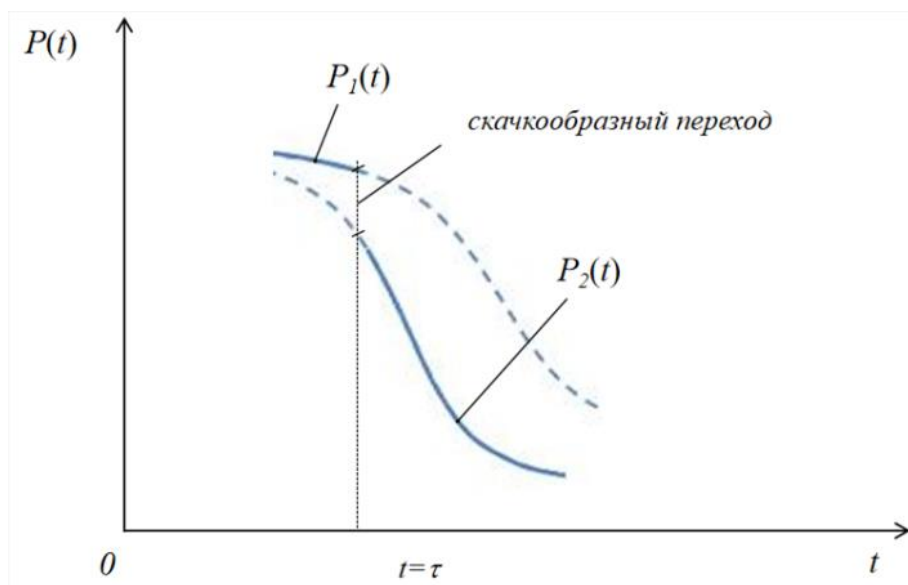


Рисунок 2. – Влияние отказа ИП на ВБР трубы

Такая система будет иметь два работоспособных состояния (с работоспособным ВЭ и неработоспособным ВЭ), каждое из которых будет характеризоваться собственными показателями надежности – $P_1(t)$ и $P_2(t)$. Поскольку указанные состояния системы представляют собой несовместимые события, полная вероятность безотказной работы системы будет равна:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t). \quad (4)$$

ВБР системы при исправности обоих элементов составит:

$$P_1(t) = P_{OЭ}(t) \cdot P_{BЭ}(t). \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы системы при исправном ОЭ и неисправном ВЭ определяется усреднением по условной ВБР $P_{OЭ}(t)$ по формуле:

$$P_2(t) = \int_0^t P_{OЭ}(\tau, t) d(Q_{BЭ}(\tau)), \quad (6)$$

где $P_{OЭ}(\tau, t)$ – вероятность того, что ОЭ исправно проработает время при исходном уровне надежности системы, а затем еще время $(t - \tau)$, но уже при остаточном, сниженном уровне надежности;

$d(Q_{BЭ}(\tau)) = -d(P_{BЭ}(\tau)) = -P'_{BЭ}(\tau) \cdot d\tau$ – вероятность того, что ВЭ исправно проработает время и откажет на малом промежутке времени $d\tau$, примыкающем к τ справа.

Используя формулу полной вероятности, получаем следующее выражение для ВБР системы:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) = P_{OЭ}(t) \cdot P_{BЭ}(t) + \int_0^t P_{OЭ}(\tau, t) d(Q_{BЭ}(\tau)). \quad (7)$$

Аналогичным образом можно получить формулу для расчета ВБР системы «труба-изоляция-ЭХЗ», но с учетом влияния не одного ИП, а комплексной защиты в целом.

Среднее время безотказной работы T_o (математическое ожидание времени работы объекта до отказа) может быть получено с помощью выражения:

$$T_o = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (8)$$

Таким образом, линейный участок стального подземного газопровода с точки зрения надежности может рассматриваться как сложная техническая система с неравноценными элементами (основным элементом, определяющим работоспособное/неработоспособное состояние системы, и вспомогательными, защитными элементами, снижающими уровень воздействия внешних влияющих факторов), что повышает степень подобия надежной модели реальному техническому объекту.

Понятие степени ответственности элемента. Такое представление о неравноценности элементов сложной технической системы и, соответственно, несопоставимости влияния последствий отказов различной «весовой категории» на общую надежность системы близко соотносится с понятием «степени ответственности» элемента или части объекта, используемым в отдельных нормативных источниках, например, в СН 1.04.01-2020⁵ и ГОСТ Р 54418.1-2012⁶.

В область действия СН 1.04.01-2020 входит определение технического состояния зданий и сооружений, строительных конструкций и инженерных систем и оценка их пригодности к эксплуатации. В этих целях СН 1.04.01-2020 регламентируют соответствующую методику, в которой оценка технического состояния объекта производится на основании степени распространения дефектов, их класса (по сути, степени опасности) и степени ответственности элемента или части объекта. При этом к степени ответственности 1 относятся такие элементы, локальный отказ которых ведёт к полному или частичному отказу системы, снижению эксплуатационного качества или технико-экономических показателей (ТЭП), а к степени ответственности 2 относятся все остальные элементы.

При прочих равных условиях по степени распространения и опасности дефектов, КТС элементов степени ответственности 2 определяется на ранг или два выше. Всего документом устанавливается пять категорий – от I до V, в порядке увеличения степени износа и понижения уровня технического состояния.

ГОСТ Р 54418.1-2012 устанавливает основные технические требования к конструкции ветроэнергетических установок (ВЭУ) с учетом обеспечения гарантированного уровня надежности при всех возможных рисках, возникающих в течение их жизненного цикла. ВЭУ являются техническими устройствами повышенной сложности, подвергающимися нестабильным по времени и интенсивности ветровым нагрузкам. Методика проектирования ВЭУ, предлагаемая данным документом, предусматривает использование при расчетах парциальных коэффициентов безопасности, учитывающих неопределенность, непостоянство прикладываемых нагрузок и свойств материалов, различного рода погрешности, неполное соответствие расчетных моделей и методов расчета, степень ответственности несущих элементов конструкции и последствия отказов.

В части последствия отказа и степени ответственности элемента конструкции устанавливается три класса элементов:

- 1-й класс используется для безопасных элементов конструкции, отказ которых не приводит к отказу основных частей ВЭУ, например, заменяемые подшипники, находящиеся под контролем системы управления;
- 2-й класс используется для «непредохраняемых» элементов конструкции, отказы которых могут привести к отказу основных частей ВЭУ;
- 3-й класс используется для «непредохраняемых» механических элементов, которые связывают приводы и тормоза с главными элементами конструкции без резервирования функций защиты ВЭУ.

Если масштабировать данную классификацию на более общий уровень, то к 1-му классу будут относиться элементы, локальный отказ которых не приводит к отказу системы, ко 2-му – элементы, отказ которых может привести к отказу системы, к 3-му – элементы, отказ которых приводит к отказу системы немедленно.

Применительно к такой технической системе, как стальной подземный газопровод, если иметь в виду его конструктивное исполнение с комплексной антикоррозийной защитой, к 1-му классу следует относить отказы одного из вспомогательных элементов при работоспособном состоянии другого, ко 2-му классу – совместный отказ ИП и ЭХЗ, к 3-му – отказ трубы. Для варианта исполнения «труба-изоляция» отказ ИП в условиях низкой коррозионной агрессивности внешней среды будет относиться к 1-му классу, однако при повышении агрессивности среды до среднего или высокого уровня – уже ко 2-му классу. Данная техническая ситуация является достаточно редкой, однако представляет повышенную опасность, так как в этом случае конструктивное исполнение объекта с определенного момента перестает соответствовать условиям эксплуатации.

Таким образом, мы получаем более подробную и чувствительную к месту и роли различных элементов в общей конструкции газопровода иерархическую структуру его возможных неисправностей.

Степень влияния дефекта изоляционного покрытия на эксплуатационное состояние газопровода. Находясь под воздействием системы разнонаправленных процессов и претерпевая различные дефекты, повреждения и отказы, газопровод последовательно проходит ряд эксплуатационных (технических) состояний различного уровня надежности.

С точки зрения теории надежности любой технический объект может находиться в состояниях исправности и неисправности, работоспособности и неработоспособности. При этом понятие «исправность» шире понятия «работоспособность»: исправный объект удовлетворяет всем требованиям, а работоспособный – лишь тем, которые обеспечивают его нормальное функционирование [16].

⁵ СН 1.04.01-2020. Техническое состояние зданий и сооружений. – Минск: Стройтехнорм, 2021. – 68 с.

⁶ ГОСТ Р 54418.1-2012. Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Ч. 1. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 82 с.

Очевидно, что и на уровне рассмотрения изолирующего покрытия как отдельного элемента газопровода, и на уровне рассмотрения газопровода как технической системы дефект изоляции является неисправностью, то есть событием, переводящим и само покрытие, и весь газопровод в целом в неисправное состояние.

Выше мы выяснили, что дефект изоляции не может классифицироваться как отказ газопровода. Однако с точки зрения влияния дефекта ИП на работоспособность самого элемента ситуация также требует уточнения. В этой связи рассмотрим, насколько вообще обосновано отнесение дефекта ИП к отказам, то есть событиям, переводящим технический объект в неработоспособное состояние.

Отказы технических объектов различаются по видам и классифицируются по различным признакам [17; 18]. Данная классификация в необходимом для целей исследования объеме приведена в таблице 2.

Таблица 2. – Классификация отказов технических объектов

Признак отказа	Вид отказа	Характеристика отказа
Связь с отказами других элементов (узлов, устройств)	Независимый	Отказ не обусловлен повреждениями или отключениями других элементов (узлов, устройств)
	Зависимый	Отказ обусловлен отказами других элементов (узлов, устройств)
Возможность использования элемента после отказа	Полный	Полная потеря работоспособности, исключающая использование объекта по назначению
	Частичный	Дальнейшее использование технического объекта возможно, но с меньшей эффективностью
Характер проявления отказа	Сбой	Самоустраняющийся отказ, приводящий к кратковременному нарушению работоспособности
	Перебегающий	Многokrатно возникающий сбой одного и того же характера, связанный с обратными случайными изменениями режимов работы и параметров устройства
	Устойчивый	Отказ, устраняемый только в результате проведения восстановительных работ, является следствием необратимых процессов в деталях и материалах

Согласно приведенной классификации, легко установить, что дефект изоляционного покрытия, если рассматривать его как отказ, можно однозначно определить по двум признакам (связь с отказами других элементов и характер проявления отказа) как независимый и устойчивый.

Что касается такого признака отказа, как возможность дальнейшего использования элемента, то на первый взгляд дефект ИП можно рассматривать как его частичный отказ, считая, что после возникновения дефекта использование изоляции осуществляется с меньшей эффективностью. Однако такой вывод приводит к противоречиям. С одной стороны, по своей конструкции ИП является по сути сплошной оболочкой над внешней поверхностью трубы, и его барьерные свойства на всем протяжении участка трубопровода после возникновения единичного дефекта, помимо конкретного места расположения дефекта, никак не ухудшатся. То есть снижение эффективности в таком случае будет носить локальный характер: дефект изоляции не повлияет на работоспособность покрытия во всех остальных точках его поверхности.

С другой стороны, непосредственно контактируя с эксплуатационной средой, изоляция в первую очередь подвергается воздействию ее негативных факторов и в силу своей барьерной роли имеет в каком-то смысле жертвенный, «расходный» характер. Соответственно, дефект изоляционного покрытия является наиболее распространенным и многочисленным видом неисправности в такой технической системе, как газопровод. Учитывая, что эксплуатационный контроль и ремонт ИП происходит с определенной периодичностью, то есть дефекты не устраняются немедленно после возникновения, и существует определенная вероятность появления новых дефектов сразу после проведения ремонтных работ, мы будем вынуждены расценивать техническое состояние ИП как неработоспособное практически все время эксплуатации газопровода.

Следовательно, необходимо определить меру снижения эффективности ИП, которую возможно использовать в качестве критерия его отказа. При этом данная мера должна прямо отражать изменение технического состояния изоляции и иметь количественное измерение.

Данная задача может быть решена в рамках так называемого «физико-вероятностного» или «вероятностно-физического» подхода, устанавливающего связь вероятности отказа технического объекта с достижением выбранного на основании анализа физических процессов деградации физическим параметром объекта (такой параметр называется определяющим) предельного уровня, вызывающего отказ [19–21].

Решение облегчается тем, что в нашем случае дефект изоляции имеет конкретный физический смысл – это сквозное повреждение, в месте которого фиксируется контакт «труба-земля». Каждый такой контакт создает предпосылку образования коррозионного повреждения (можно сказать, создает «потенциальную коррозионную ситуацию»), в большей или меньшей степени (в зависимости от наличия ЭХЗ и агрессивности внешней среды) снижая общую надежность газопровода.

В таком случае, в качестве определяющего физического параметра защитного покрытия естественно рассматривать его целостность (сплошность). При этом, учитывая, что потенциально коррозионную ситуацию на газопроводе создает любой сквозной дефект изоляции, вне зависимости от размеров (более того, сравнительно небольшие по площади повреждения изоляции могут приводить к случаям язвенной и питтинговой коррозии, опасной ускоренным проникновением вглубь металла трубы), степень сохранения (потери) целостности и наступление предельного состояния ИП целесообразно оценивать по количеству (плотности) дефектных мест на участке газопровода.

Такой подход даст возможность статистической оценки средней скорости обобщенного процесса деградации изоляции по эксплуатационным данным [21; 22], которая, в свою очередь, в дальнейшем может быть использована в качестве отправного (системного) показателя технического состояния ИП при проведении расчетов (прогнозировании) надежности газопроводов при эксплуатации и на стадии проектирования.

Заключение. Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы.

1. На основе анализа конструктивного устройства и особенностей функционирования стальных подземных газопроводов показано, что линейный участок такого газопровода с точки зрения надежности может рассматриваться как сложная техническая система из неравноценных элементов: основного элемента (стальной трубы), состояние которого непосредственно определяет работоспособное/неработоспособное состояние всей системы, и вспомогательных элементов (изоляция и электрохимической защиты), снижающих уровень коррозионного воздействия грунта на основной элемент. Такая система будет иметь два работоспособных состояния со скачкообразным понижением уровня надежности вследствие отказа вспомогательного элемента (элементов), что повышает степень подобия модели реальному техническому объекту.

2. В рамках предложенной модели построена иерархическая структура неисправностей различных элементов с учетом их влияния на общее техническое состояние газопровода. Для конструктивного исполнения газопровода, оборудованного комплексной антикоррозийной защитой, к 1-му, наименее опасному классу следует относить отказы одного из вспомогательных элементов при работоспособном состоянии другого, ко 2-му классу – совместный отказ ИП и ЭХЗ, к 3-му – отказ трубы. Для варианта исполнения «труба-изоляция» отказ ИП в условиях низкой коррозионной агрессивности внешней среды будет относиться к 1-му классу, однако при повышении агрессивности среды до среднего или высокого уровня – уже ко 2-му классу. Последняя техническая ситуация представляет повышенную опасность, так как в этом случае конструктивное исполнение объекта с определенного момента перестает соответствовать условиям эксплуатации.

3. Уточнено место защитного покрытия в обеспечении надежности стальных подземных газопроводов. Показано, что дефект изоляции создает потенциальную коррозионную ситуацию и может классифицироваться как неисправность. Вместе с тем, единичный дефект ИП имеет точечный характер, не влияя на работоспособность покрытия во всех остальных точках его поверхности. В этой связи предложено в качестве определяющего физического параметра защитного покрытия рассматривать его целостность, а степень сохранения (потери) целостности и наступление предельного состояния изоляции оценивать по количеству (плотности) дефектов, нарушающих целостность покрытия.

4. Предлагаемый подход дает возможность провести статистическую оценку средней скорости обобщенного процесса деградации изоляции по эксплуатационным данным, получаемым при периодическом приборном обследовании газопроводов. Такая оценка, в свою очередь, в дальнейшем может быть использована в качестве отправного (системного) показателя технического состояния ИП при проведении расчетов (прогнозировании) надежности газопроводов, что позволит повысить точность расчетной методики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розанов Б.Г. Живой покров Земли. – М.: Педагогика, 1989. – 128 с.
2. Притула В.В. Современные проблемы защиты от подземной коррозии // Коррозия территории «Нефтегаз». – 2012. – № 3(23). – С. 18–21.
3. Романюк В.Н., Струцкий Н.В. Применяемые изоляционные покрытия распределительных газопроводов в Республике Беларусь и их характеристика // Наука и техника. – 2023. – № 4. – С. 308–316. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-4-308-316.
4. Справочник по надежности: в 3 т. / под ред. Б.Е. Бердичевского. – М.: Мир, 1970. – Т. 3. – 376 с.
5. Струцкий Н.В., Романюк В.Н. Алгоритм расчета надежности единичного линейного участка стального подземного трубопровода // Наука и техника. – 2023. – № 22(6). – С. 519–529. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-6-519-529.
6. Зиневич А.М. Научно-техническое обеспечение надежности сооружения линейной части магистральных трубопроводов. – М.: Информнефтегазстрой, 1984. – 132 с.
7. Кац Л., Линковский Ж. Некоторые вопросы исследования надежности трубопроводов ВНИИЭгазпром // Экспресс-информация. – 1970. – № 23. – С. 15–28.

8. Харионовский В.В., Родин В.П. Вопросы надежности и живучести магистральных трубопроводов как линейных систем // Вопросы надежности газопроводных конструкций: сб. науч. тр. – М.: ВНИИгаз, 1993. – 125 с.
9. Рудаченко А.В., Байкин С.С. Эксплуатационная надежность трубопроводных систем: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008. – 118 с.
10. Дейнеко С.В. Обеспечение надежности систем трубопроводного транспорта нефти и газа. – М.: Техника, ТУМА ГРУПП, 2011. – 176 с.
11. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
12. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 256 с.
13. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
14. Гуров С.В., Уткин Л.В. Надежность восстанавливаемых резервированных систем с последствием отказов // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 1. – С. 137–151.
15. Жаднов В.В., Полесский С.Н. Определение показателей надежности систем, обладающих вспомогательными элементами // Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем: сб. науч. тр. – М.: МИЭМ, 2006. – С. 151–158.
16. Ивашков И.И. Монтаж, эксплуатация и ремонт подъемно-транспортных машин: учеб. – М.: Машиностроение, 1981. – 335 с.
17. Кочерга В.Г. Основы надежности оборудования: учеб. пособие. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. – 98 с.
18. Быков И.Ю., Цахадая Н.Д. Эксплуатационная надежность и работоспособность нефтегазовых и буровых машин: учеб. пособие. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2010. – 298 с.
19. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
20. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
21. Стрельников В.П. Новая технология исследования надежности машин и аппаратуры // Математические машины и системы. – 2007. – № 3–4. – С. 227–238.
22. Острейковский В.А. Физико-статистические модели надежности элементов ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.

REFERENCES

1. Rozanov, B.G. (1989). *Zhivoi pokrov Zemli*. Moscow: Pedagogika. (in Russ.).
2. Pritula, V.V. (2012). Sovremennye problemy zashchity ot podzemnoi korrozii. *Korroziya territorii «Neftegaz»*, (3), 18–21. (In Russ.).
3. Romanyuk, V.N. & Strutskiy, N.V. (2023). Primenyaemye izolatsionnye pokrytiya raspredelitel'nykh gazoprovodov v Respublike Belarus' i ikh harakteristika [Applied Insulating Coatings for Gas Distribution Pipelines in the Republic of Belarus and Their Characteristics]. *Nauka i Tekhnika [Science and technology]*, (4), 308–316. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-4-308-316. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Berdichevskii, B.E. (Eds.) (1970). *Spravochnik po nadezhnosti*: v 3 t. T. 3. Moscow: Mir. (in Russ.).
5. Strutskiy, N.V. & Romanyuk, V.N. (2023). Algoritm rascheta nadezhnosti edinichnogo lineinogo uchastka stal'nogo podzemnogo truboprovoda [Algorithm for Calculating Reliability of Single Linear Section of Steel Underground Pipeline]. *Nauka i Tekhnika [Science and technology]*, 22(6), 519–529. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-6-519-529. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Zinevich, A.M. (1984). *Nauchno-tekhnicheskoe obespechenie nadezhnosti sooruzheniya lineinoi chasti magistral'nykh truboprovodov*. Moscow: Informneftegazstroj. (In Russ.).
7. Kats, L. & Linkovskii, Zh. (1970). Nekotorye voprosy issledovaniya nadezhnosti truboprovodov VNIIEgazprom. *Ekspress-informatsiya*, (23), 15–28. (In Russ.).
8. Kharionovskii, V.V. & Rodin, V.P. (1993). Voprosy nadezhnosti i zhivuchesti magistral'nykh truboprovodov kak lineinykh sistem. *Voprosy nadezhnosti gazoprovodnykh konstruksii*. Moscow: VNIIGaz. (In Russ.).
9. Rudachenko, A.B. & Baikin, C.C. (2008). *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' truboprovodnykh sistem*. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. (In Russ.).
10. Deineko, S.V. (2011). *Obespechenie nadezhnosti sistem truboprovodnogo transporta nefti i gaza*. Moscow: Tekhnika, TUMA GRUPP. (In Russ.).
11. Belyaev, Yu.K., Bogatyrev, V.A., Bolotin, V.V., Rudenko, Yu.N., Ushakov, I.A., Barlou, R. ... Soares, K.A. (1985). *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: spravochnik*. In I.A. Ushakov (Eds.). Moscow: Radio i svyaz'. (In Russ.).
12. Viktorova, V.S. & Stepanyants, A.S. (2014). *Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem*. Moscow: LENAND. (In Russ.).
13. Polovko, A.M. & Gurov, S.V. (2006). *Osnovy teorii nadezhnosti*. 2-e izd., pererab. i dop. S.-Peterburg: BKhV-Peterburg. (In Russ.).
14. Gurov, S.V. & Utkin, L.V. (2017). Nadezhnost' vosstanavliyaemykh rezervirovannykh sistem s posledestviem otkazov. *Avtomatika i telemekhanika*, (1), 137–151. (In Russ.).
15. Zhadnov, V.V. & Poleskii, S.N. (2006). Opredelenie pokazatelei nadezhnosti sistem, obladayushchikh vspomogatel'nymi elementami. *Proektirovanie telekommunikatsionnykh i informatsionnykh sredstv i sistem* (151–158). Moscow: MIEM. (In Russ.).
16. Ivashkov, I.I. (1981). *Montazh, ekspluatatsiya i remont pod'emno-transportnykh mashin*. Moscow: Mashinostroyeniye. (In Russ.).
17. Kocherga, V.G. (2015). *Osnovy nadezhnosti oborudovaniya*. Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS. (In Russ.).
18. Bykov, I.Yu. & Tskhadaya, N.D. (2015). *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' i rabotosposobnost' neftegazopromyslovykh i burovykh mashin*. Moscow: CentrLitNefteGaz. (In Russ.).
19. Druzhinin, G.V. (1986). *Nadezhnost' avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem*. Moscow: Energoatomizdat. (In Russ.).
20. Pogrebinskii, S.B. & Strel'nikov, V.P. (1988). *Proektirovanie i nadezhnost' mnogoprotsessornykh EVM*. Moscow: Radio i svyaz'. (In Russ.).
21. Strel'nikov, V.P. (2007). Novaya tekhnologiya issledovaniya nadezhnosti mashin i apparatury. *Matematicheskie mashiny i sistemy*, (3-4), 227–238. (In Russ., abstr. in Ukrainian, abstr. in Engl.).
22. Ostreikovskii, V.A. (1986). *Fiziko-statisticheskie modeli nadezhnosti elementov YaEU*. Moscow: Energoatomizdat. (in Russ.).

Поступила 09.12.2023

**THE PLACE OF INSULATION COATINGS IN ENSURING
RELIABILITY STEEL UNDERGROUND GAS PIPELINES****V. ROMANIUK***(Belarusian National Technical University, Minsk)***N. STRUTSKY***(Beltopgaz SPA, Minsk)*

The article examines the issue of the place and role of insulating coatings in ensuring the reliability of steel underground gas pipelines. It has been shown that insulation is the main, basic means of protection against corrosion. A reliability model has been proposed for a linear section of a steel underground gas pipeline as a complex technical system consisting of unequal elements: a steel pipe as the main element that determines the operability/inoperability state of the system, and auxiliary protective elements – insulation and electrochemical protection, which reduce the level of corrosive effects of soil on the main element. This increases the degree of similarity of the reliability model to a real technical object, and also makes it possible to build a hierarchical structure of faults of various elements, taking into account their impact on the overall technical condition of the gas pipeline. It is proposed to consider its integrity as the determining physical parameter of the protective coating; the degree of preservation (loss) of integrity and the onset of the limiting state of the insulation should be assessed by the number (density) of defects.

Keywords: gas distribution network, underground steel gas pipeline, system with unequal elements, insulating coating, reliability, defect, failure.

УДК 624.07

DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-21-27

**ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ИЗ КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ, УСИЛЕННЫХ ПОД НАГРУЗКОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОБОЙМОЙ**

канд. техн. наук А.М. ХАТКЕВИЧ¹⁾, д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ²⁾,
канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ³⁾

(1), 2) Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 3) ООО «СофтКлуб», Минск)

¹⁾a.khatkevich@psu.by, ²⁾d.lazovski@psu.by, ³⁾d.gluhov@psu.by

Статья посвящена моделированию напряженно-деформированного состояния сечений коротких элементов из кирпичной кладки, усиленных под нагрузкой железобетонной обоймой. Особенностью моделирования является возможность учета физической нелинейности деформирования кирпичной кладки, бетона и продольной арматуры обоймы, а также напряженного состояния до начала усиления. Приведены предложения по последовательности расчета элементов, подвергающихся усилению, разрешающие уравнения общего деформационного метода. На примере короткого элемента выполнено численное исследование. В рамках проверок предельного состояния несущей способности сопоставлены значения сопротивления сжатию в предельной по прочности стадии по действующим нормам проектирования и по предложенной методике. Результаты расчетов подтвердили возможность применения деформационной модели для вычисления параметров напряженно-деформированного состояния коротких элементов из кирпичной кладки, усиленных под нагрузкой железобетонной обоймой.

Ключевые слова: железобетонная обойма, усиление, физическая нелинейность, диаграмма деформирования, методика расчета, предельное состояние, расчетное значение сопротивления сжатию, деформационный подход.

Введение. Реконструкция зданий и сооружений, связанная с увеличением нагрузок либо с восстановлением получивших в процессе эксплуатации повреждения несущих конструкций, зачастую сопровождается необходимостью их усиления. Усиление сжатых конструкций из кирпичной кладки, в частности столбов или простенков, для обеспечения выполнения условий предельного состояния несущей способности, эксплуатационной пригодности и живучести, как правило, производится изменением параметров их поперечных сечений. Возможны варианты увеличения поперечного сечения путем дополнительной кирпичной кладки либо путем устройства различного типа обойм.

При повышении сопротивления сжатию за счет дополнительной кладки сложным вопросом остается обеспечение совместной работы с существующим сечением, поскольку основной фактор, обеспечивающий совместную работу конструкции, – перевязка – не может быть выполнена. К тому же такой вариант зачастую неприменим ввиду снижения эксплуатационных характеристик здания, поскольку происходит значительное уменьшение полезной площади и размеров оконных и/или дверных проемов и т.п. В связи с вышесказанным наиболее целесообразным вариантом усиления является включение кладки в обойму, которая в свою очередь может быть трех видов: стальная, железобетонная и армированная растворная.

Усиление обоймой к тому же является весьма эффективным методом еще и за счет работы кирпичной кладки в условиях всестороннего сжатия, что увеличивает сопротивляемость воздействию продольных сил. Наиболее высокую степень увеличения сопротивления сжатию каменной кладки достигают применением стальных и железобетонных обойм. Совместная работа последней с кирпичной кладкой обеспечивается устройством борозд и/или расчисткой швов кладки; бетонирование производят методом инъектирования, нагнетая смесь через инъекционные отверстия в опалубке, торкретированием или последовательным бетонированием с наращиванием опалубки. Расчет усиливаемых конструкций выполняют в соответствии с основными требованиями, установленными в СН 2.01.01¹⁾, согласно которому проверки предельного состояния несущей способности STR следует выполнять исходя из условия

$$E_d \leq R_d, \quad (1)$$

где E_d – расчетное значение эффектов воздействий (внутреннее усилие, вызванное расчетным воздействием нагрузок на конструкцию);

R_d – расчетное значение сопротивления, для сжатых элементов $R_d = N_{Rd}$.

¹⁾ СН 2.01.01-2022. Основы проектирования строительных конструкций. Взамен СН 2.01.01-2019. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 60 с.

Определение расчетных значений сопротивления сжатию элементов из кирпичной кладки по СП 1.04.03-2022² выполняется по методу сечений без учета деформационных характеристик материалов, составляющих поперечное сечение простенка или столба, усиленного железобетонной облоймой. Как отмечалось в [1–4], учет физической нелинейности при проектировании является важным направлением в области приближения расчетных моделей к действительной работе конструкций и, соответственно, повышения точности проводимых расчетов.

Применение деформационного подхода к вычислению расчетных значений сопротивления сжатию N_{Rd} для выполнения проверок предельного состояния несущей способности элементов из кирпичной кладки, усиленных железобетонной облоймой, является целью данной работы.

Исследования каменных элементов в облойме. Метод усиления кладки облоймами известен относительно давно, и соответствующие исследования по выявлению эффективности различного рода облойм и основных факторов, влияющих на сопротивление сжатию, выполнялись еще в первой половине прошлого века В.А. Камейко, Р.Н. Квитницким, М.Я. Пильдишем и др. [5].

Представленная в их работах формула по вычислению сопротивления сжатию столбов или простенков в железобетонной облойме практически без существенных изменений вошла в ряд ТНПА^{3 4}. В последние годы проводились исследования, связанные с напряженно-деформированным состоянием сжатых элементов в облоймах при местном сжатии, исследования по возможности и эффективности использования вместо обычного тяжелого бетона сталефибробетона и легких бетонов для устройства облойм [6–11].

Актуальные белорусские нормы СП 1.04.03-2022 проверку предельного состояния несущей способности столба или простенка из кирпичной каменной кладки, усиливаемого облоймой, при эксцентриситете продольного усилия, не выходящем за пределы ядра поперечного сечения, рекомендуют выполнять из условия, согласно которому расчетное значение продольного усилия N_{Ed} в произвольном сечении столба или простенка не должно превышать расчетного значения сопротивления сжатию этого сечения N_{Rd} . Значение сопротивления сжатию поперечного сечения столба или простенка из кирпичной кладки, усиленного железобетонной облоймой:

$$N_{Rd} = \psi \varphi \left[\left(m_k f_d + \eta \cdot \frac{3\mu_{ad}}{1 + \mu_{ad}} \cdot \frac{f_{ywd,ad}}{100} \right) \cdot A + A_{s2,ad} f_{yd,ad} + \gamma_{c,ad} f_{cd,ad} A_{c,ad} \right], \quad (2)$$

где ψ – коэффициент уменьшения сопротивления сжатию элемента, усиленного облоймой, учитывающий влияние эксцентриситета приложения продольной силы относительно центра тяжести сечения каменной кладки e ;

φ – коэффициент продольного изгиба усиливаемого столба или простенка;

m_k – коэффициент, учитывающий наличие трещин в каменной кладке. Принимается равным: 1,0 – для кладки без повреждений; 0,7 – для кладки с трещинами;

f_d – расчетное значение прочности на сжатие каменной кладки, МПа;

η – коэффициент уменьшения прочности на растяжение хомутов облоймы, учитывающий влияние эксцентриситета e_0 приложения сжимающей нагрузки;

μ_{ad} – процент поперечного армирования;

$A_{s2,ad}$ – площадь сечения продольной арматуры, мм²;

$\gamma_{c,ad}$ – коэффициент условий работы бетона облоймы. Принимается равным: 1 – при передаче нагрузки на облойму и наличии опоры облоймы снизу; 0,7 – при передаче нагрузки на облойму и отсутствии опоры внизу облоймы; 0,35 – без непосредственной передачи нагрузки на облойму;

$f_{cd,ad}$ – расчетное значение прочности на сжатие бетона облоймы;

$A_{c,ad}$ – площадь поперечного сечения бетона облоймы, заключенного между хомутами и кладкой (до защитного слоя), мм².

Следует отметить отсутствие строгих указаний к (2) с отражением граничных значений процента армирования и наличие в нормах расчетных характеристик лишь для арматурной стали S240.

Также общие требования расчета усиливаемых конструкций регламентируют следующее положение – «при расчете конструкций, усиление которых выполняют под нагрузкой, учитывают напряжения, существующие в сохраняемых конструкциях в момент усиления». В то же время формула (2) не позволяет реализовать данное положение, а выполнить усиление простенка или столба с полной разгрузкой на практике невозможно.

Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) усиленных под нагрузкой железобетонной облоймой сжатых элементов из кирпичной кладки. Вычисление сопротивления сжатию и параметров НДС на любом этапе деформирования простенка или столба из каменной кладки, усиленного путем увеличения поперечного сечения железобетонной облоймой, производят методом сечений на основе общей деформационной модели [4].

² СП 1.04.03-2022. Обследование и усиление каменных и армокаменных конструкций. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 78 с.

³ См. сноску 2.

⁴ Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций (к СНиП II-22-81): утв. Госстроем СССР 15.08.85 / Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций. – М.: Центр. ин-т типового проектирования, 1987. – 150 с.

Расчет простенка или столба из каменной кладки, усиленного железобетонной облоймой, следует выполнять в следующей последовательности:

- первый этап заключается в определении параметров НДС усиливаемой конструкции на воздействия в момент выполнения усиления;
- второй этап предполагает учет технологических факторов во время выполнения усиления, главным из которых является усадка бетона облоймы;
- третий этап предполагает расчет параметров НДС и сопротивления сжатию после выполнения усиления, набора прочности бетона, приложения дополнительной нагрузки и т.д.

В связи с относительно небольшим влиянием на НДС усадки бетона усиления целесообразно расчет выполнять в два этапа.

Поперечное сечение каменного элемента рассматривается в виде совокупности k элементарных площадок (слоев) с площадью i -й площадки (слоя) A_{mi} . В пределах элементарных площадок (слоев) нормальные напряжения σ считаются равномерно распределенными, равными среднему значению напряжений на границах площадок (слоев). Продольное усилие N_1 действует на расстоянии e_y и e_x от центра тяжести сечения. Распределение относительных деформаций ε_z по поперечному сечению принимается линейным, тогда разрешающие уравнения для общего случая косоугольного внецентренного сжатия на первом этапе принимают вид:

$$\varepsilon_{N1} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} + \frac{1}{r_{x1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \frac{1}{r_{y1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) - N_1 = 0; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{N1} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \frac{1}{r_{x1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0)^2 + \frac{1}{r_{y1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0)(y_{mi} - y_0) - N_1 e_x = 0; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{N1} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \frac{1}{r_{x1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)(x_{mi} - x_0) + \frac{1}{r_{y1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)^2 - N_1 e_y = 0, \quad (5)$$

где ε_{N1} – продольные относительные деформации на уровне центра тяжести сечения от действия продольного усилия N_1 ;

E'_{mi} – текущее значение секущего модуля для элементарных площадок поперечного сечения усиливаемой конструкции;

ε_{mi} – относительные деформации в i -й элементарной площадке;

$1/r_{y1}, 1/r_{x1}$ – кривизна в плоскости оси y и x соответственно от действия усилия N_1 ;

y_{mi}, x_{mi} – координаты центра тяжести i -й элементарной площадки (слоя);

y_0, x_0 – координаты центра тяжести расчетного поперечного сечения.

На втором этапе разрешающие уравнения при действии дополнительного продольного усилия $N_{z,ad}$:

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{N2} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} + \varepsilon_{N,ad} \left(\sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} \right) + \\ & + \frac{1}{r_{x2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \frac{1}{r_{x,ad}} \left(\sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (x_{sj} - x_0) \right) + \\ & + \frac{1}{r_{y2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \frac{1}{r_{y,ad}} \left(\sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (y_{sj} - y_0) \right) - N_2 = 0; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{N2} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \varepsilon_{N,ad} \left(\sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (x_{sj} - x_0) \right) + \\ & + \frac{1}{r_{x2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0)^2 + \frac{1}{r_{x,ad}} \left(\sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (x_{mi} - x_0)^2 + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (x_{sj} - x_0)^2 \right) + \\ & + \frac{1}{r_{y2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0)(y_{mi} - y_0) + \\ & + \frac{1}{r_{y,ad}} \left(\sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (x_{mi} - x_0)(y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (x_{sj} - x_0)(y_{sj} - y_0) \right) - N_2 e_x = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
& \varepsilon_{N2} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \varepsilon_{N,ad} \left(\sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj} (y_{sj} - y_0) \right) + \\
& + \frac{1}{r_{x2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) (x_{mi} - x_0) + \\
& + \frac{1}{r_{x,ad}} \left(\sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn} (y_{mi} - y_0) (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (x_{sj} - x_0) (y_{sj} - y_0) \right) + \\
& + \frac{1}{r_{y2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)^2 + \frac{1}{r_{y,ad}} \left(\sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (y_{mi} - y_0)^2 + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (y_{sj} - y_0)^2 \right) - N_2 e_y = 0.
\end{aligned} \tag{8}$$

где ε_{N2} – продольные относительные деформации на уровне центра тяжести сечения, представляющие собой сумму деформаций ε_{N1} и $\varepsilon_{N,ad}$ от дополнительного продольного усилия $N_{z,ad}$;

$1/r_{y2}$, $1/r_{x2}$ – кривизна в плоскости оси y и x соответственно от действия продольного усилия N_2 ;

$1/r_{y,ad}$, $1/r_{x,ad}$ – кривизна в плоскости оси y и x соответственно от действия продольного усилия $N_{z,ad}$;

N_2 – продольное усилие на втором этапе, равно сумме усилий N_1 и $N_{z,ad}$;

$E'_{cn,ad}$ – текущее значение секущего модуля для элементарных площадок бетона обоймы усиления;

$E'_{sj,ad}$ – текущее значение секущего модуля арматуры обоймы усиления;

$A_{cn,ad}$ – площадь элементарных площадок бетона обоймы усиления;

$A_{sj,ad}$ – площадь j -го стержня продольной арматуры обоймы усиления.

При этом на втором этапе следует учесть изменение диаграммы деформирования кирпичной кладки ввиду ее работы в условиях всестороннего сжатия.

Для численного исследования используем следующие материалы:

– кирпичная кладка из керамических изделий 1-й группы ($\varepsilon_{mu} = -3,5 \text{ ‰}$; $\varepsilon_{m1} = -2,0 \text{ ‰}$) с приведенной прочностью при сжатии $f_b = 30 \text{ МПа}$ на стандартном кладочном растворе заданного качества М10. Класс контроля выполнения работ – I, $\gamma_M = 1,7$. Характеристическая прочность кладки с учетом наличия продольного шва $f_k = 0,8 \times 8,6 = 6,88 \text{ МПа}$. Расчетная прочность кладки $f_d = f_k / \gamma_M = 6,88 / 1,7 = 4,05 \text{ МПа}$. Дефекты и повреждения (трещины) в кладке отсутствуют $m_k = 1$.

– продольное и поперечное армирование железобетонной обоймы принимаем в виде стержневой арматуры класса S 240. Считаем, что нагрузка передается с двух сторон (сверху и снизу обоймы), тогда для продольной арматуры $f_{yd,ad} = 190 \text{ МПа}$, поперечной $f_{ywd,ad} = 150 \text{ МПа}$;

– бетон обоймы С16/20 мелкозернистый классов подвижности ПЗ-П4 с $f_{cd,ad} = 10,67 \text{ МПа}$ и $E = 0,85 \times 28 = 23,8 \text{ ГПа}$ ($\varepsilon_{cu2} = -3,5 \text{ ‰}$; $\varepsilon_{c2} = -2,0 \text{ ‰}$).

Вычисления выполняем для короткого элемента в виде столба (простенка) поперечным сечением $b \times h = 2 \times 2$ кирпича ($510 \times 510 \text{ мм}$). Железобетонная обойма выполняется толщиной 80 мм с защитным слоем 40 мм. Пример напряженно-деформированного состояния рассматриваемого элемента в предельной стадии по прочности показан на рисунках 1, 2.

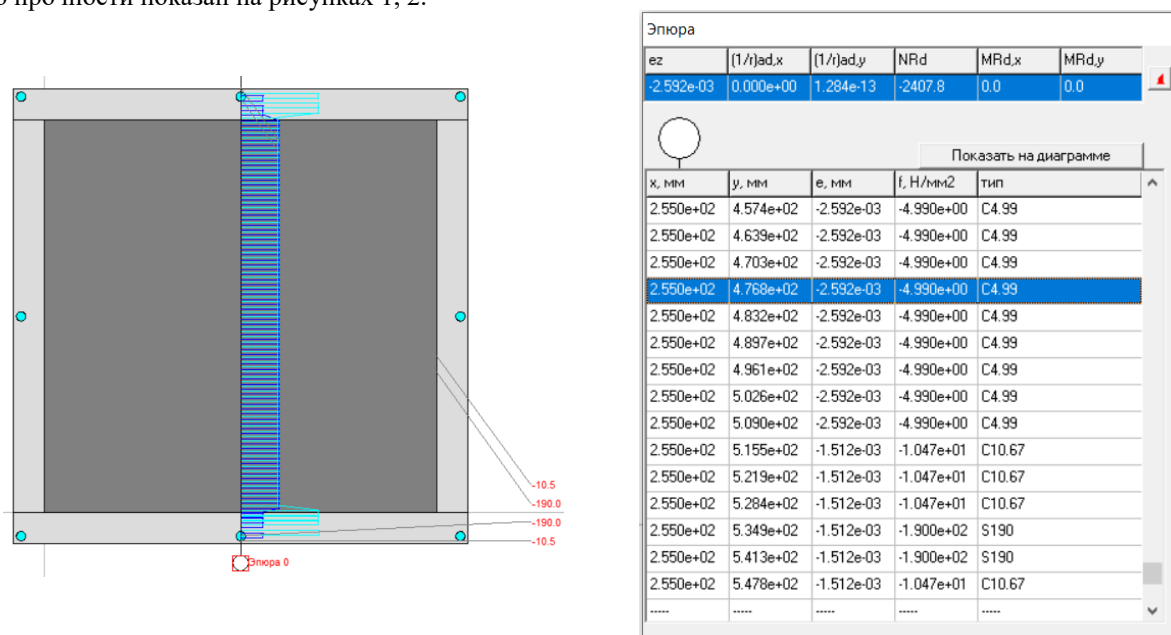
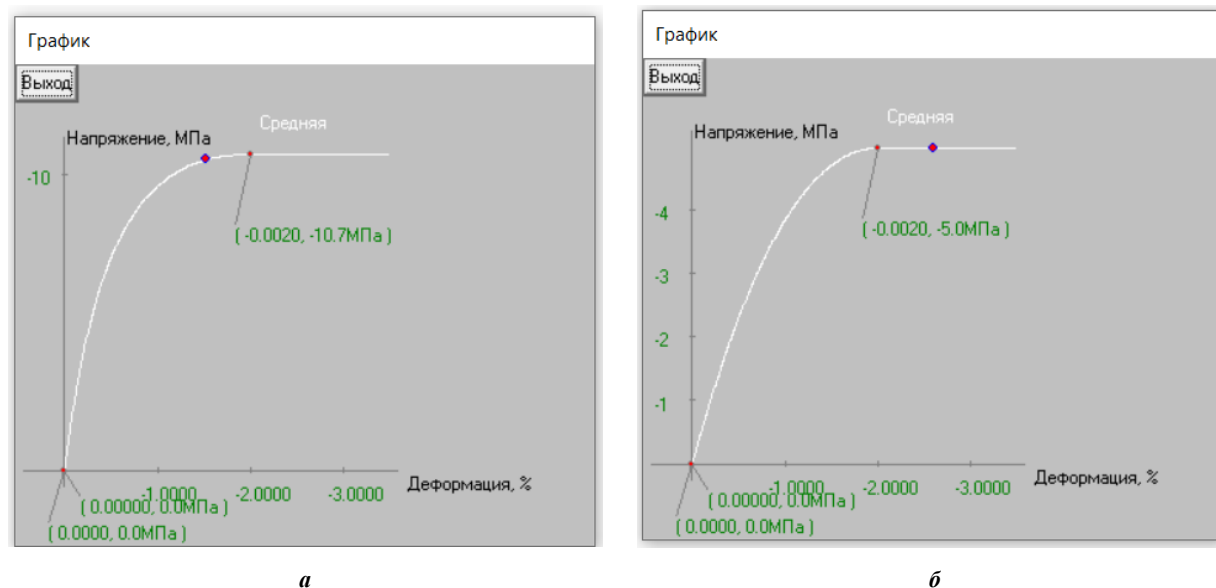


Рисунок 1. – Напряженно-деформированное состояние поперечного сечения из каменной кладки, усиленного железобетонной обоймой



а – диаграмма бетона усиления; б – диаграмма кирпичной кладки

Рисунок 2. – Расчетные диаграммы деформирования

Анализируя НДС рассматриваемого сечения, можно заметить, что в предельной стадии прочность кирпичной кладки реализована полностью (напряжения 4,99 МПа, переход на горизонтальный участок диаграммы), напряжения в бетоне 10,47 МПа.

Расчетные значения сопротивления сжатию сечений элементов $N_{Rd,2}$ по описанной методике расчета вычислены в программе «Beta_K». Расчетные значения $N_{Rd,1}$ вычислены по (2). Результаты сравнения $N_{Rd,1}$ и $N_{Rd,2}$ показаны на рисунке 3.

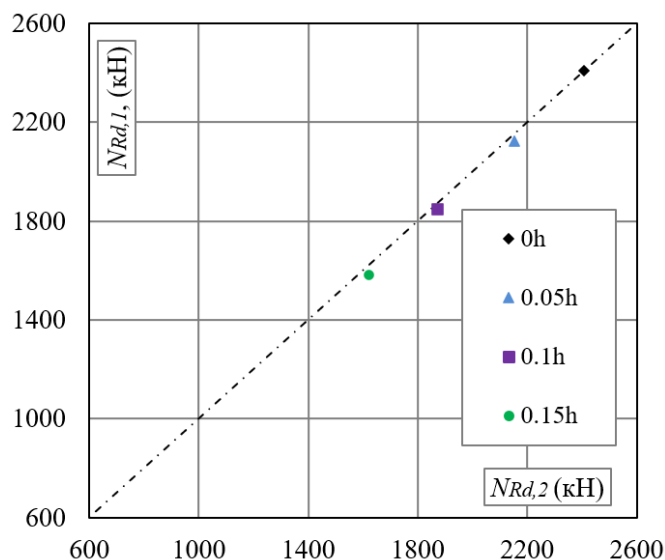


Рисунок 3. – Сравнение значений N_{Rd} при различных эксцентриситетах (0÷0,15h)

Заключение. Подтверждена возможность применения деформационного подхода к моделированию напряженно-деформированного состояния сжатых элементов из кирпичной кладки, усиленных под нагрузкой железобетонной обоймой, основанного на учете физической нелинейности материалов, составляющих поперечное сечение.

Сопоставление расчетных значений сопротивлений, вычисленных по зависимостям норм проектирования СП 1.04.03-2022 «Обследование и усиление каменных и армокаменных конструкций» и по предлагаемой методике, показывает их удовлетворительную сходимость (расхождения результатов вычисления прочности в предельной стадии не превышает 5%).

Предлагаемый деформационный подход, в отличие от прочностного, позволяет получать параметры напряженно-деформированного состояния на любой стадии деформирования усиленного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчета. – М.: АСВ, 2019. – 194 с.
2. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Аналитическая оценка напряженно-деформированного состояния каменных кладок при сжатии на основе авторской теории // Строит. материалы. – 2019. – № 9. – С. 51–55. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55.
3. Деформационный подход к вычислению расчетных значений сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов в рамках проверок предельного состояния несущей способности / А.М. Хаткевич, Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр.-во. Приклад. науки. – 2023. – № 2(34). – С. 2–9. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-34-2-2-9.
4. Лазовский Д.Н., Хаткевич А.М. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию армокаменных элементов // Вестн. МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 12. – С. 1638–1652. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1638-1652.
5. Пильдиш М.Я., Поляков С.В. Каменные и армокаменные конструкции зданий. – 2-е изд., перераб. – М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1955. – 400 с.
6. Новожилова Н.С. Исследование напряженного состояния кирпичной кладки, усиленной железобетонной обоймой из легких бетонов // Строит. механика и расчет сооружений. – 2021. – № 6(299). – С. 13–18. DOI: 10.37538/0039-2383.2021.6.13.18.
7. Новожилова Н.С. Исследование напряженного состояния кирпичных стен, усиленных двухсторонним бетонным наращиванием, при местном сжатии // Вестн. гражд. инженеров. – 2021. – № 6(89). – С. 34–41. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-6-34-41.
8. Пантелеев Н.Н., Спарина Г.П. К вопросу определения несущей способности каменных столбов, усиленных обоймами // Проектирование и стр-во в Сибири. – 2007. – № 5. – С. 22–23.
9. Бедов А.И. Несущая способность элементов из каменной кладки, усиленных сталефибробетонными обоймами // Пром. и гражд. стр-во. – 2016. – № 7. – С. 45–50.
10. Радаев А.В. Усиление каменной кладки железобетонной обоймой // Молодой ученый. – 2022. – № 48(443). – С. 42–46.
11. Новожилова Н.С., Рудаков Н.М. Анализ методов расчета кирпичной кладки, усиленной железобетонной обоймой, при местном краевом сжатии // Строит. механика и расчет сооружений. – 2023. – № 2(307). – С. 46–52. DOI: 10.37538/0039-2383.2023.2.46.52.

REFERENCES

1. Karpenko, N.I., Sokolov, B.S. & Radaikin, O.V. (2019). *Proektirovanie betonnykh, zhelezobetonnykh, kamennykh i armokamennykh elementov i konstruktii s primeneniem diagrammykh metodov rascheta*. Moscow: ASV. (In Russ.).
2. Sokolov, B.S. & Antakov, A.B. (2019). Analiticheskaya otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kamennykh kladok pri szhatii na osnove avtorskoi teorii [Analytical assessment of the stress-strain state of masonry under compression based on the author's theory]. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, (9), 51–55. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55.
3. Khatkevich, A.M., Lazovskii, D.N., Glukhov, D.O. & Chaparanganda, E. (2023). Deformatsionnyi podkhod k vychisleniyu raschetnykh znachenii soprotivleniya szhatiyu kamennykh i armokamennykh elementov v ramkakh proverok predel'nogo sostoyaniya nesushchei sposobnosti [Deformation approach to calculating the calculated values of compressive resistance of stone and reinforced stone elements within the framework of testing the limit state of bearing capacity]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Construction. Applied Science]*, 34(2), 2–9. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.52928/2070-1683-2023-34-2-2-9.
4. Lazovskii, D.N. & Khatkevich, A.M. (2022). Deformatsionnyi podkhod k raschetu soprotivleniya szhatiyu armokamennykh elementov [Deformation approach to calculating the compression resistance of reinforced masonry elements]. *Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]*, 17(12), 1638–1652. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1638-1652.
5. Pil'dish, M.Ya. & Polyakov, S.V. (1955). *Kamennye i armokamennye konstruktii zdaniy*. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture. (In Russ.).
6. Novozhilova, N.S. (2021). Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya kirpichnoi kladki, usilennoi zhelezobetonnoi oboimoi iz legkikh betonov [Study of the stressed state of brickwork reinforced with a reinforced concrete frame made of lightweight concrete]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii [Structural mechanics and calculation of structures]*, 299(6), 13–18. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.37538/0039-2383.2021.6.13.18.
7. Novozhilova, N.S. (2021). Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya kirpichnykh sten, usilennykh dvukhstoronnim betonnykh naraashchi-vaniem, pri mestnom szhatii [Study of the stress state of brick walls reinforced with double-sided concrete build-up under local compression]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Vestnik civil engineers]*, 89(6), 34–41. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-6-34-41.
8. Panteleev, N.N. & Sparina, G.P. (2007). K voprosu opredeleniya nesushchei sposobnosti kamennykh stolbov, usilennykh oboimami [On the issue of determining the load-bearing capacity of stone pillars reinforced with clips]. *Proektirovanie i stroitel'stvo v Sibiri [Design and construction in Siberia]*, (5), 22–23. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Bedov, A.I. (2016). Nesushchaya sposobnost' elementov iz kamennoi kladki, usilennykh stalefibrobetonnyimi oboimami [Load-bearing capacity of masonry elements reinforced with steel-fiber-concrete frames]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]*, (7), 45–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Radaev, A.V. (2022). Usilenie kamennoi kladki zhelezobetonnoi oboimoi [Strengthening masonry with reinforced concrete frame]. *Molodoi uchenyi [Young scientist]*, 443(48), 42–46. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Novozhilova, N.S. & Rudakov, N.M. (2023). Analiz metodov rascheta kirpichnoi kladki, usilennoi zhelezobetonnoi oboimoi, pri mestnom kraevom szhatii [Analysis of methods for calculating brickwork reinforced with reinforced concrete frames under local edge compression]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii [Structural mechanics and calculation of structures]*, 2(307), 46–52. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.37538/0039-2383.2023.2.46.52.

Поступила 08.12.2023

A DEFORMATION APPROACH TO MODELING THE STRESS-STRAIN STATE OF COMPRESSED BRICKWORK ELEMENTS REINFORCED UNDER LOAD WITH A REINFORCED CONCRETE CAGE**A. KHATKEVICH¹⁾, D. LAZOUSKI²⁾, D. GLUKHOV³⁾****(^{1), 2)}Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, ³⁾LLC «SoftClub», Minsk)**

The article is devoted to modeling the stress-strain state of sections of short elements made of brickwork reinforced under load with a reinforced concrete cage. A feature of the modeling is the possibility of taking into account the physical nonlinearity of deformation of the brick hoard, concrete and longitudinal reinforcement of the cage, as well as the stress state before the start of reinforcement. The proposals on the sequence of calculation of the elements undergoing reinforcement, the solving equations of the general deformation method are given. A numerical study was performed on the example of a short element. As part of the checks of the limiting state of the bearing capacity, the values of compression resistance in the maximum strength stage were compared according to the current design standards and according to the proposed methodology. The calculation results confirmed the possibility of using a deformation model to calculate the parameters of the stress-strain state of short elements made of brickwork reinforced under load with a reinforced concrete cage.

Keywords: reinforced concrete cage, reinforcements, physical nonlinearity, deformation diagram, calculation method, limit state, calculated value of compression resistance, deformation approach.

ЭФФЕКТИВНЫЙ ВАРИАНТ АРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛОМАНОГО ОЧЕРТАНИЯ

Н.В. МАТВЕЕНКО

(Брестский государственный технический университет)

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9888-0672>

Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических исследований сопротивления срезу и образования трещин элементов ломаного очертания, в отечественной и зарубежной литературе отсутствуют достоверные данные о распределении напряжений в подобных элементах в зонах вблизи переломов граней.

В статье по результатам экспериментальных исследований выполнен анализ напряженно-деформированного состояния элементов ломаного очертания. Выявлены основные конструктивные факторы, влияющие на распределение напряжения, а также на характер образования и развития трещин. Установлено, что в двускатных балках наклонные трещины образуются не только в приопорной зоне, но и в середине пролета непосредственно у конька даже при отсутствии поперечной силы. Особенности напряженно-деформированного состояния балок ломаного очертания связаны с возникновением касательных напряжений от действия изгибающего момента и продольной силы из-за переменной высоты сечения элемента, а также с формированием локальных полей напряжений в зонах вблизи переломов граней.

На основании данных, полученных в ходе экспериментально-теоретических исследований, предложен эффективный вариант армирования коньковых зон железобетонных двускатных балок и рам.

Ключевые слова: предварительно напряженные железобетонные балки, напряженно-деформированное состояние, трещиностойкость, балка ломаного очертания, переменная высота.

Введение. В последнее время многие исследователи занимаются изучением характера напряженно-деформированного состояния элементов ломаного очертания: двускатных железобетонных балок, ригелей монолитных рам. При этом пристальное внимание уделяется влиянию конструктивных факторов (угол наклона верхней грани, размеры поперечного сечения, предварительное напряжение) на сопротивление срезу и трещиностойкость подобных элементов.

Ряд исследователей [1; 2] утверждают, что сопротивление срезу балок с наклонной нижней гранью и балок прямолинейного очертания не имеет существенных различий. В то же время некоторые экспериментальные исследования¹ доказывают, что в балках подобного типа в большей степени проявляется так называемый арочный эффект, в связи с чем отмечаются определенные отличия в характере работы балок ломаного очертания и балок с параллельными гранями. При этом принято считать, что сопротивление срезу двускатных балок выше аналогичных балок с параллельными гранями [3–7].

Несмотря на большое количество выполненных экспериментов, среди исследователей отсутствует единое мнение о влиянии на характер разрушения и картину образования и развития трещин конструктивных особенностей двускатных балок, а также необходимости их учитывать при выполнении соответствующих расчетов.

Выполненный анализ нормативно-технической литературы, а также актуальных исследований установил, что все рекомендации по расчету и конструированию двускатных железобетонных балок касаются только приопорной зоны и учитывают только влияние на напряженно-деформированное состояние элементов переменной высоты сечения, при этом не учитывается изменение направления траекторий главных напряжений в зонах вблизи перелома граней. При проведении натурных испытаний двускатных балок в ряде случаев [4; 7] отмечается, что ориентация трещин в таких балках не соответствует классическим представлениям о характере работы однопролетной балки, нагруженной в середине пролета сосредоточенной силой: трещины в середине пролета развивались под углом к продольной оси, в то время как в приопорной зоне возникали нормальные трещины. При постановочных испытаниях балок типа «бумеранг» в РУП «Институт БелНИИС» были также зафиксированы наклонные трещины в зоне чистого изгиба (рисунок 1). Такой характер распространения трещин, по всей видимости, может быть объяснен тем, что в элементах с переменной высотой сечения касательные напряжения возникают не только от поперечной силы, но и от действия изгибающего момента и продольной силы. Также следует учитывать, что в местах перелома сжатой грани двускатных балок формируются усилия, перпендикулярные продольной оси элемента. Эти усилия представляют собой проекцию равнодействующих усилий в сжатой зоне бетона на биссектрису угла излома и приводят к возникновению растягивающих напряжений в поперечном направлении.

¹ Cyclic shear behavior of reinforced concrete haunched beams [Electronic resource] / A. Tena-Colunga, H.I. Archundia-Aranda, A. Grande-Vega et al. // Earthquake Engineering: 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering: Proceedings / Ottawa, Canada (June 26-29, 2007). – 2007. – P. 184–194. URL: https://www.researchgate.net/publication/259482908_Cyclic_shear_behavior_of_reinforced_concrete_haunched_beams.

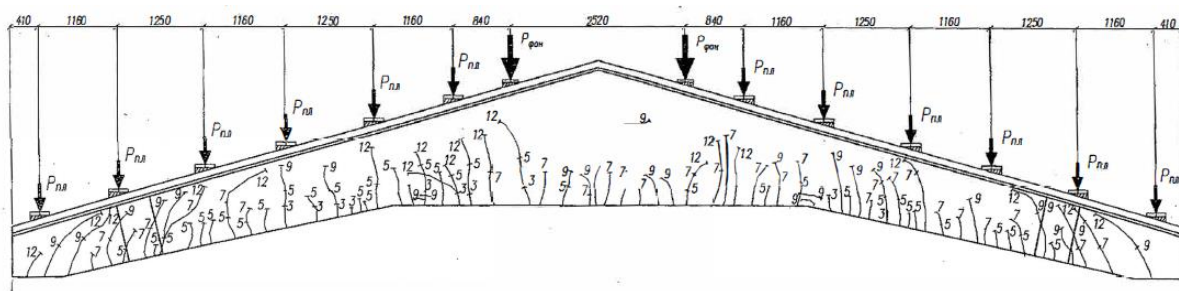
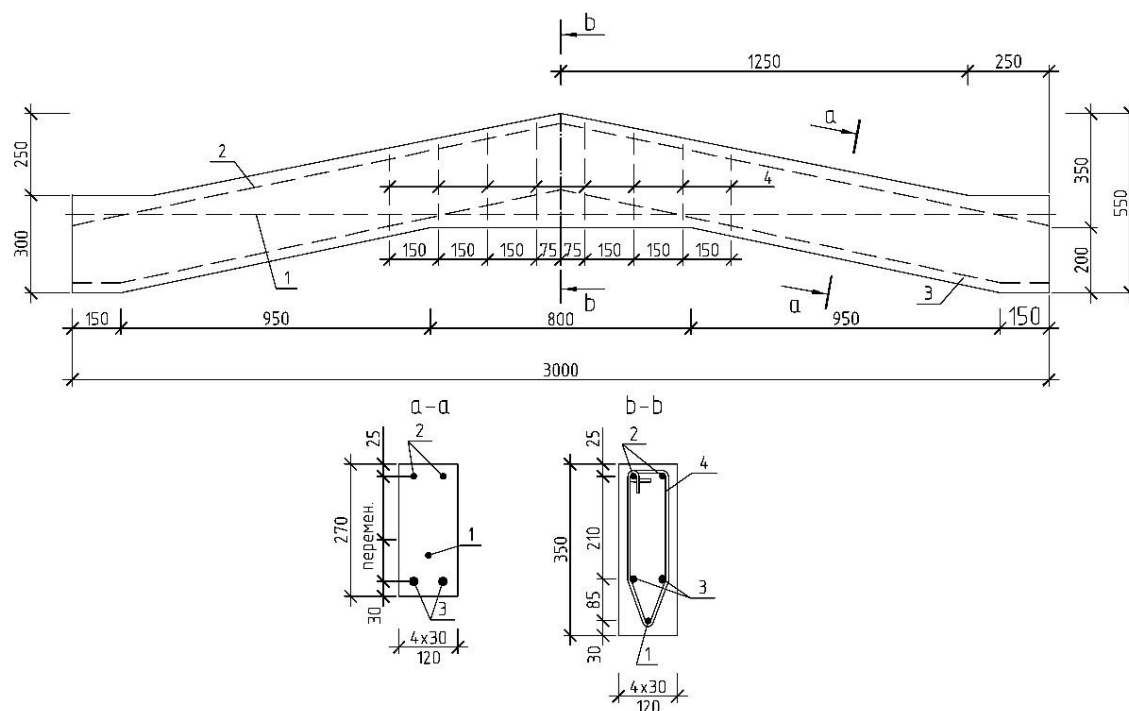


Рисунок 1. – Картина образования и развития трещин по результатам постановочных испытаний балок типа «бумеранг» в РУП «Институт БелНИИС»

Экспериментальные исследования. Для оценки влияния конструктивных факторов на напряженно-деформированное состояние коньковой зоны балки, а также разработки рекомендаций по эффективному армированию указанных зон на базе Брестского государственного технического университета были изготовлены и испытаны две группы предварительно напряженных балок ломаного очертания: с поперечной арматурой в середине пролета и без нее. Конструктивное решение и схема испытания опытных балок были приняты таким образом, чтобы в середине пролета не возникала поперечная сила. Конструктивное решение опытных балок представлено на рисунке 2 и в таблице 1.

Таблица 1. – Основные характеристики экспериментальных балок

Марка балок	Размеры, см				Поперечная арматура в средней части	f_{cm} , МПа	Напрягаемая арматура	Величина предварительного напряжения арматуры, МПа
	b	h_k	h_n	l_0				
Б-1	12	35	27	280	-	37,50	Ø12,5 Y1860 S7	1 226,60
Б-2	12	35	27	280	-	36,71	Ø12,5 Y1860 S7	1 214,15
Б-3	12	35	27	280	Ø6 S240 шаг 150 мм	57,46	Ø12,5 Y1860 S7	778,09
Б-4	12	35	27	280	Ø6 S500 шаг 150 мм	56,55	Ø14 S800	502,57



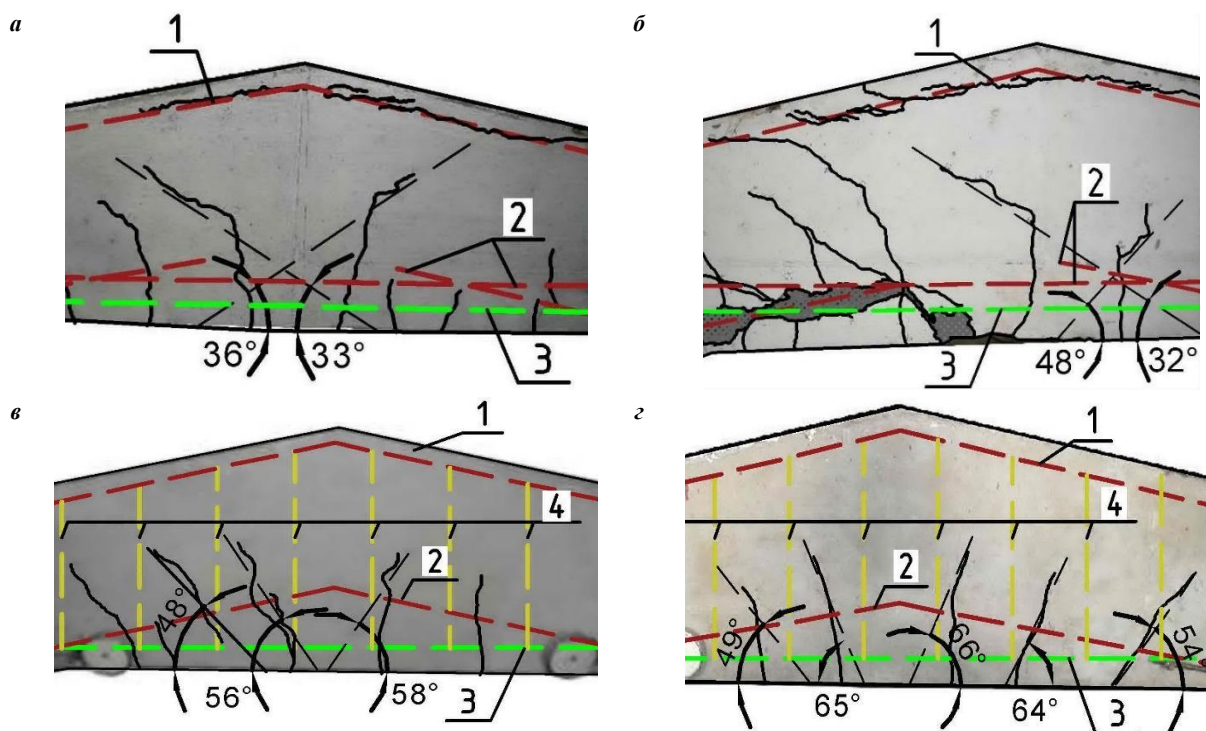
1 – напрягаемая арматура; 2 – сжатая арматура; 3 – растянутая ненапрягаемая арматура; 4 – поперечная арматура

Рисунок 2. – Конструктивное решение и схема испытания экспериментальных балок

В балках первой группы с большей величиной усилия предварительного обжатия бетона и без поперечного армирования развитие трещин в средней части пролета происходило в два этапа. Первоначально образовывались трещины, перпендикулярные нижней грани балки. Выше трассы напрягаемой арматуры происходило резкое отклонение трещин по направлению к пролетному грузу. В балках второй группы с поперечной арматурой в средней части пролета большинство трещин в зоне близи перелома верхней грани изначально имело угол наклона к нижней грани $65^\circ\div 75^\circ$. По мере увеличения нагрузки и развития трещин их угол наклона постепенно уменьшался и составил в момент перед разрушением $51^\circ\div 52^\circ$.

Все испытанные балки имели примерно одинаковое сопротивление к образованию трещин, нормальных к продольной оси ($M_{cr} = 15\div 20 \text{ кН}\cdot\text{м}$), поскольку снижение усилия предварительного обжатия бетона в балках второй группы компенсировалось более высокой прочностью бетона.

В балках второй группы имела в растянутой зоне непрерывная в виде двух цельных стержней ненапрягаемая арматура с перегибом в нормальном сечении, проходящем по коньку балки. Благодаря такому конструктивному решению в средней части балки продольная ненапрягаемая арматура располагалась под углом к продольной оси и подобно отогнутой арматуре пересекала возникающие наклонные трещины под углом $60^\circ\div 80^\circ$. Совместно с поперечным армированием зоны вблизи перелома сжатой грани балки эта особенность конструктивного решения позволила ограничить развитие диагональных трещин. Данное обстоятельство проявлялось в меньшей ширине раскрытия трещин в момент разрушения, а также в более крутом расположении траектории трещин: $49^\circ\div 54^\circ$ в балках Б-3 и Б-4 в сравнении с $33^\circ\div 36^\circ$ в балках Б-1 и Б-2 (рисунок 3). Наличие хомутов вблизи перелома верхней грани в балках Б-3 и Б-4 также позволило исключить разрушение балки по одной из наклонных трещин, образующихся в середине пролета балки.



1 – траектория сжатой арматуры; 2 – траектория растянутой ненапрягаемой арматуры;
3 – траектория напрягаемой арматуры; 4 – траектория поперечной арматуры

a – балка Б-1 ($M_{exp} = 40 \text{ кН}\cdot\text{м}$); *б* – балка Б-2 ($M_{exp} = 37,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$)
в – балка Б-3 ($M_{exp} = 37,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$); *з* – балка Б-4 ($M_{exp} = 37,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$)

Рисунок 3. – Картина трещинообразования зоны вблизи конька балок

Особенности армирования коньковых узлов балок и рам. Существенное влияние на напряженно-деформированное состояние зоны вблизи перелома верхней грани двускатных балок оказывает формирующаяся в коньке вертикальная проекция усилий в сжатом бетоне и сжатой рабочей или установленной с целью образования каркасов монтажной продольной арматуре. Данное усилие, направленное вертикально вверх, приводит к отрыву защитного слоя арматуры в сжатой зоне бетона, а также к возникновению в средней части пролета балки двухосного напряженного состояния, результатом которого является образование наклонных к продольной оси трещин в средней части пролета балки.

В «Руководстве по конструированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона (без предварительного напряжения)» указано, что для двускатных железобетонных балок с полкой в сжатой зоне

с целью предотвращения отрыва полки от стенки необходимо предусматривать поперечное армирование, которое воспринимало бы вертикальную составляющую от сил сжатия в верхних полках (рисунок 4). При наличии в коньке вертикального ребра эта сила может быть воспринята вертикальными стержнями, армирующими ребро. При отсутствии ребра необходимо предусмотреть в каркасе стенки дополнительные стержни, расположенные на участке длиной не более $1/3$ высоты сечения балки в коньке с обязательной приваркой вверху и внизу к продольным стержням сварных каркасов.

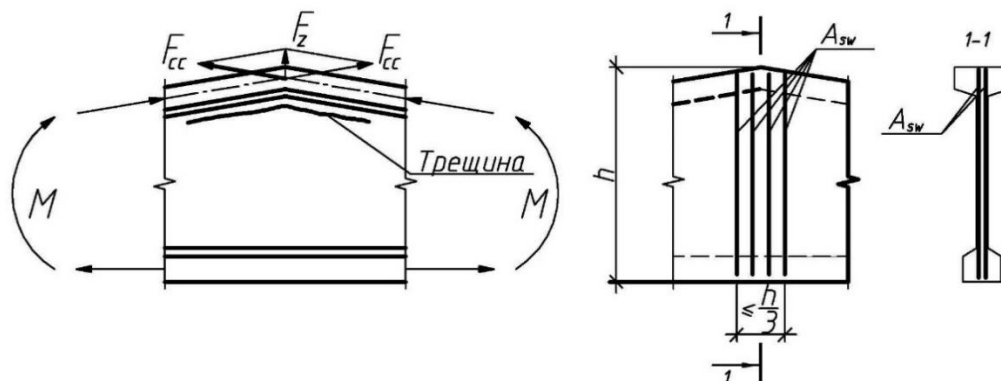


Рисунок 4. – Схема образования трещин отрыва и армирование конька двускатной балки

Армирование коньковых узлов рам рекомендуется выполнить стержнями, установленными вертикально или перпендикулярно продольной оси (под углом к нижней грани) (рисунок 5) [8], а продольные стержни заводить за точку перелома нижней грани на длину их анкеровки.

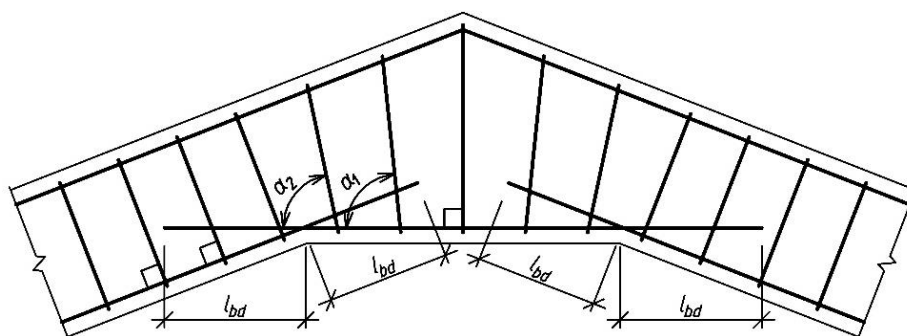


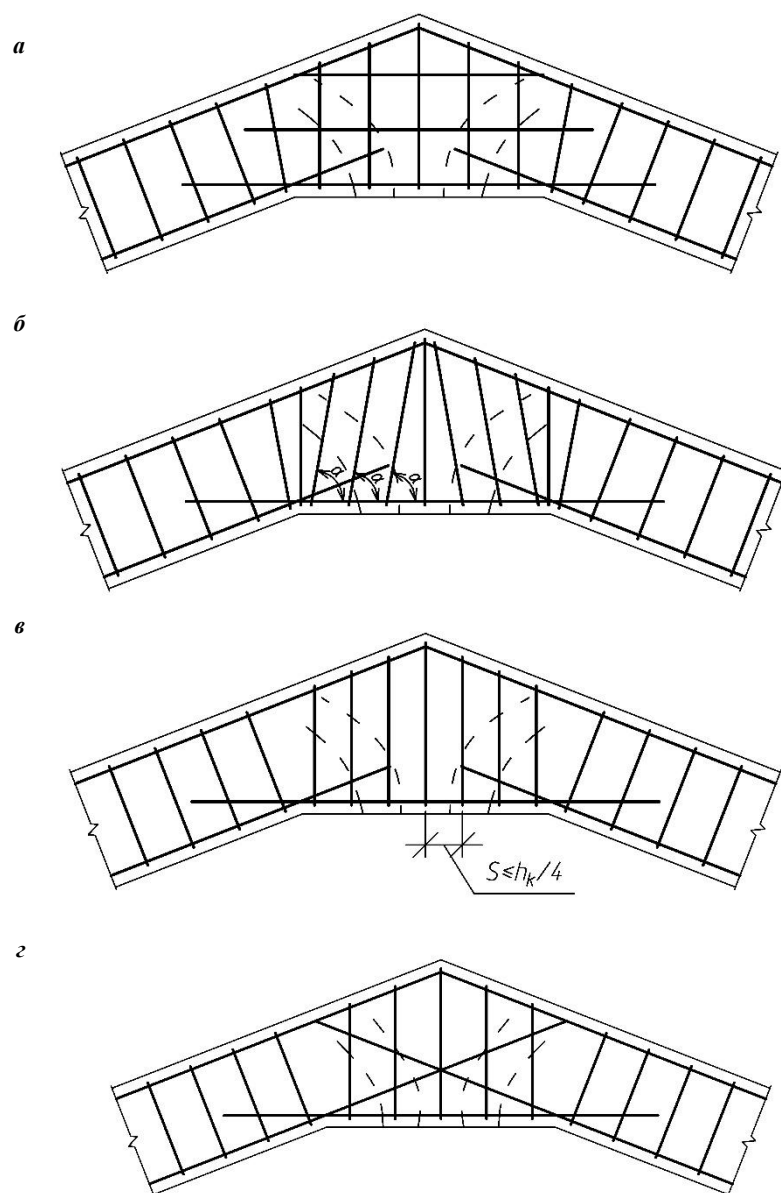
Рисунок 5. – Схема армирования конькового узла монолитных рам [8]

Приведенные в нормативных документах рекомендации не всегда позволяют эффективно использовать арматуру. Выполненные экспериментальные исследования показали, что постановка поперечной арматуры под углом к нижней грани, как изображено на рисунке 5, приводит к тому, что траектория поперечной арматуры совпадает с направлением наклонных трещин и, таким образом, она не способна препятствовать раскрытию трещин. Установленные в коньковом сечении дополнительные стержни арматуры на участке длиной $1/3$ высоты сечения балки в коньке также не могут оказать влияние на образование и развитие трещин в середине пролета двускатных балок.

Для предотвращения развития наклонных трещин в коньковой зоне балки и ограничения их ширины раскрытия наиболее эффективны следующие варианты размещения конструктивного армирования:

- постановка в коньковой зоне дополнительно продольной (горизонтальной) арматуры в количестве не менее двух стержней по высоте сечения (рисунок 6, а);
- установка поперечной арматуры под углом к продольной оси таким образом, чтобы верхние концы стержня были ориентированы к коньку балки или рамы (рисунок 6, б);
- шаг стержней вертикальной поперечной арматуры должен быть таким, чтобы наклонная трещина пересекала не менее двух стержней. Исходя из угла наклона трещины по результатам натурных испытаний шаг поперечной арматуры не должен превышать $1/3$ высоты сечения элемента в коньке (рисунок 6, в);
- в зависимости от конструктивного решения элемента ломаного очертания производить анкеровку в сжатой зоне части продольной арматуры наклонных частей балок или рам (рисунок 6, г) или доводить ее до сечения, проходящего по коньку.

Очевидно, что применение указанных вариантов армирования целесообразно в зоне действия локальных полей поперечных и касательных напряжений. По результатам выполненных экспериментально-теоретических исследований [9] длина указанной зоны составляет $4/3 h_k$.



- а – армирование горизонтальными стержнями;
 б – армирование наклонными поперечными стержнями;
 в – армирование вертикальными стержнями;
 г – анкеровка продольной арматуры наклонных частей

Рисунок 6. – Эффективные варианты армирования элементов ломаного очертания

Заключение. По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В зонах вблизи перелома граней балок формируется двухосное напряженное состояние, подобное напряженно-деформированному состоянию опорной зоны однопролетной балки постоянного сечения, что приводит к образованию наклонных трещин в указанной зоне.

2. По результатам экспериментальных исследований установлено, что в балках без поперечной арматуры в коньковой зоне угол наклона трещин составил $33^\circ \div 36^\circ$, с поперечной арматурой – $49^\circ \div 54^\circ$.

3. Приведенные в современных нормативных документах рекомендации по конструированию коньковых узлов двускатных балок и монолитных рам не учитывают возможность возникновения в них наклонных трещин и не позволяют эффективно использовать арматуру.

4. Для сдерживания развития наклонных трещин в зоне вблизи перелома верхней грани балок и рам наиболее эффективна постановка продольных стержней по высоте сечения или поперечных стержней под наклоном к продольной оси с ориентацией к месту перелома грани (коньку). Постановка вертикальной поперечной арматуры рекомендуется с шагом не более $1/3$ высоты сечения балки в коньке (h_k) на длине не менее $4/3 h_k$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Debaiky S.Y., Elniema E.I. Behavior and Strength of Reinforced Concrete Haunched Beams in Shear // *J. of ACI*. – 1982. – Vol. 79, № 3. – P. 184–194.
2. Mseer F., Alwash N. The behavior of tapered one-way continuous two-span reinforced concrete slabs under repeated load // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. – 2022. – Vol. 10, № 3. – P. 387–396. DOI: 10.21533/pen.v10i3.3109.
3. Effect of Load Distribution and Variable Depth on Shear Resistance of Slender Beams without Stirrups / A.P. Caldentey, P. Padilla, A. Muttoni et al. // *ACI Structural Journal*. – 2012. – Vol. 109, № 5. – P. 595–604.
4. Shuo T., Okubo K., Niwa J. The Shear Behavior of RC Tapered Short Beams with Stirrups // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2019. – Vol. 17. – P. 506–517. DOI: 10.3151/jact.17.9.506.
5. Shear behavior of reinforced concrete and prestressed concrete tapered beams without stirrups / Ch. Hou, T. Nakamura, T. Iwanaga et al. // *Journal of JSCE*. – 2017. – Vol. 5. – P. 170–189. DOI: 10.2208/journalofjsce.5.1_170.
6. Saba S.H.A., Mazin B.A., Bassam A.T. Response of Reinforced Concrete Tapered Beams Strengthened Using NSM-CFRP Laminates // *Tikrit Journal of Engineering Sciences*. – 2022. – № 29(1). – P. 99–110. DOI: 10.25130/tjes.29.1.8.
7. Jasim M.Dh., Nimmim H.T. Structural behavior of reinforced concrete pre-stressed tapered beams // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. – 2023. – Vol. 11, № 1. – P. 223–238.
8. Панарин Н.Я., Павлов А.П., Онуфриев Н.М. Железобетонные конструкции. – М.: Высш. шк., 1971. – 554 с.
9. Матвеевко Н.В., Малиновский В.Н., Матвеевко Е.С. Трещиностойкость наклонных сечений железобетонных элементов ломаного очертания // *Стр-во и реконструкция*. – 2023. – № 4(108). – С. 65–80.

REFERENCES

1. Debaiky, S.Y. & Elniema, E.I. (1982). Behavior and Strength of Reinforced Concrete Haunched Beams in Shear. *J. of ACI*, 79(3), 184–194.
2. Mseer, F. & Alwash, N. (2022). The behavior of tapered one-way continuous two-span reinforced concrete slabs under repeated load. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(3), 387–396. DOI: 10.21533/pen.v10i3.3109.
3. Caldentey, A.P., Padilla, P., Muttoni, A. & Ruiz, M.F. (2012). Effect of Load Distribution and Variable Depth on Shear Resistance of Slender Beams without Stirrups. *ACI Structural Journal*, 109(5), 595–604.
4. Shuo, T., Okubo, K. & Niwa, J. (2019). The Shear Behavior of RC Tapered Short Beams with Stirrups. *Journal of Advanced Concrete Technolog*, (17), 506–517. DOI: 10.3151/jact.17.9.506.
5. Hou, Ch., Nakamura, T., Iwanaga, T. & Niwa, J. (2017). Shear behavior of reinforced concrete and prestressed concrete tapered beams without stirrups. *Journal of JSCE*, (5), 170–189. DOI: 10.2208/journalofjsce.5.1_170.
6. Saba, S.H.A., Mazin, B.A. & Bassam, A.T. (2022). Response of Reinforced Concrete Tapered Beams Strengthened Using NSM-CFRP Laminates. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 29(1), 99–110. DOI: 10.25130/tjes.29.1.8.
7. Jasim, M.Dh. & Nimmim, H.T. (2023). Structural behavior of reinforced concrete pre-stressed tapered beams. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 11(1), 223–238.
8. Panarin, N.Ya., Pavlov, A.P. & Onufriev, N.M. (1971). *Zhelezobetonnye konstruksii*. Moscow: Vysshaya shkola. (In Russ.).
9. Matveenko, N.V., Malinovskii, V.N. & Matveenko, E.S. (2023). Treshchinostoykost' naklonnykh sechenii zhelezobetonnykh elementov lomanoogo ochertaniya [Shear crack resistance of reinforced concrete tapered beams]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Building and reconstruction]*, 4(108), 65–80. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 25.09.2023

EFFECTIVE OPTION OF REINFORCEMENT FOR REINFORCED CONCRETE TAPERED ELEMENTS

N. MATVEENKO
(Brest State Technical University)

Despite a large number of experimental and theoretical studies on the resistance to shear and crack formation of tapered elements, there are no reliable data in the domestic and foreign literature on the distribution of stresses in such elements in areas near fractures of the faces.

In the article, based on the results of experimental studies, an analysis of the stress-strain state of tapered elements is performed. The main design factors affecting the stress distribution, as well as the nature of the formation and development of cracks are revealed. It is established that in gable beams, inclined cracks are formed not only in the support zone, but also in the middle of the span directly at the ridge, even in the absence of transverse force. The features of the stress-strain state of the beams of the broken outline are associated with the occurrence of tangential stresses from the action of the bending moment and longitudinal force due to the variable height of the section of the element, as well as with the formation of local stress fields in areas near the fractures of the faces.

Based on the data obtained on the basis of experimental and theoretical studies, an effective option for reinforcing ridge zones of reinforced concrete gable beams and frames is proposed.

Keywords: prestressed concrete beam, stress-strain state, fracture strength, tapered beam, variable depth.

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИПСОБЕТОНА
НА ОСНОВЕ НИЗКОМАРОЧНОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО
С ОРГАНИЧЕСКИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ**

**Я.Д. МАЦКЕВИЧ¹⁾, канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА²⁾,
канд. техн. наук, доц. Л.В. ЗАКРЕВСКАЯ³⁾**

^(1), 2)Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,

**³⁾Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых)**

В статье представлены результаты исследований физико-механических свойств гипсобетона с органическим заполнителем, в качестве которого рассматривались древесные опилки и костра льна. Показано, что введение в состав гипсобетона органических заполнителей приводит к снижению прочностных показателей, плотности, коэффициента размягчения, а также к увеличению пористости и водопоглощения. Отмечается, что свойства гипсобетонов с древесными опилками и кострой льна отличаются. При одинаковом количестве органических заполнителей в составе гипсобетона костра льна дает большее снижение прочности, плотности, коэффициента размягчения и пористости. Костра льна не изменяет подвижность исходной гипсобетонной смеси и не влияет на водопоглощение гипсобетона. Гипсобетон с кострой льна быстрее теряет влагу при твердении в воздушно-сухих условиях, что позволит снизить энергозатраты на сушку изделий. Показано, что эффективность применения органических заполнителей в гипсобетоне может быть повышена при использовании совместно со стеклянной фиброй.

Ключевые слова: гипсовое вяжущее, органические заполнители, древесные опилки, костра льна, стеклянная фибра, гипсобетон, физико-механические свойства.

Введение. Обеспечение высоких потребительских качеств современных зданий невозможно без применения стеновых материалов, обладающих повышенными тепло- и звукоизоляционными свойствами. При этом одним из основных требований потребителей является низкая стоимость изделий. Анализ показывает, что высокими тепло- и звукоизоляционными характеристиками обладают легкие бетоны на органических заполнителях, а снижение стоимости возможно за счет применения более дешевых компонентов бетонной смеси на основе местных сырьевых ресурсов.

В Республике Беларусь в достаточном количестве имеются древесные опилки и костра льна. Среди преимуществ опилок перед другими видами заполнителей следует отметить, что это древесные отходы без дополнительной обработки; опилки имеют однородное гранулированное строение, что обеспечивает равномерное распределение в бетонных смесях [1]. Отмечается [2], что опилкобетон на основе опилок мелкой фракции имеет больший предел прочности на сжатие. Костра льна представляет собой измельченные при первичной переработке одревесневшие части стеблей льна. На её долю приходится 60–70% массы перерабатываемых стеблей льна [3]. Костра льна имеет следующие специфические свойства: низкую плотность (110...120 кг/м³), малую теплопроводность (0,037...0,041 Вт/(м·°C)), низкую влажностную набухаемость, не превышающую 2%, значительное содержание лигнина в органической части до 46% [4].

Как показывают исследования [5–7], применение древесных заполнителей в составе цементных бетонов требует проведения «минерализации» от действия «цементных ядов», что предусматривает многоступенчатую обработку заполнителя химическими веществами, которая в итоге усложняет технологию изготовления и приводит к удорожанию изделий. Отмечается [8], что на гипсовое вяжущее «цементные яды» не оказывают влияния. Гипсовые вяжущие также позволяют значительно сократить сроки достижения марочной прочности бетонов, создают в помещениях наиболее благоприятный для организма человека микроклимат. Гипсовые вяжущие низких марок имеют более низкую стоимость по сравнению с другими вяжущими веществами.

Возможность рационального использования повсеместно имеющихся древесных опилок и костры льна и низкомарочного гипсового вяжущего открывает широкие перспективы расширения сырьевой базы производства легких гипсобетонов при одновременном решении проблем охраны окружающей среды. Целью настоящих исследований является изучение влияния древесных опилок, костры льна, стеклянной фибры на физико-механические свойства гипсобетона на основе низкомарочного гипса.

Исследования выполнялись в рамках НИР «Легкие бетоны на основе биозаполнителя и комплексного гипсового вяжущего для стеновых ограждений» (№ ГР 20230695 от 16.05.2023 г., грант Министерства образования Республики Беларусь).

Характеристика материалов и методика проведения исследований. Для проведения экспериментальных исследований использовался гипс строительный «Тайфун Мастер» № 35 марки Г-5 III А производства ООО «Тайфун» по ГОСТ 125¹. Время начала схватывания гипса составило 9 мин 30 с, время окончания схватывания – 15 мин. Коэффициент нормальной густоты – 0,56. Вода для затворения вяжущего и гипсобетона соответствовала требованиям ГОСТ 23732-2011². В качестве фибры для дисперсного армирования легкого бетона использовалось фибра стеклянная длиной 12 мм согласно ТС ВУ 691581903.001–2018³. В качестве органического заполнителя использовались древесные опилки и костра льна (рисунок 1). Древесные опилки являются отходами лесохозяйственного производства Государственного опытного лесохозяйственного учреждения «Островецкий опытный лесхоз». Для экспериментальных исследований применялись опилки лиственных пород с размером частиц до 5 мм. Насыпная плотность опилок составила 0,258 кг/м³, влажность – 4%. Костру льна использовали с размером частиц до 20 мм по длине. Насыпная плотность костры льна составила 0,154 кг/м³, влажность 0%.



а



б

а – древесные опилки; б – костра льна

Рисунок 1. – Органический заполнитель

Физико-механические характеристики определялись, исходя из следующих показателей: сроки схватывания, прочность на растяжение при изгибе, прочность при сжатии, плотность, водопоглощение и водостойкость. Сроки схватывания гипсового вяжущего, испытания на прочность на растяжение при изгибе, прочность при сжатии, водопоглощение, водостойкость – по ГОСТ 23789-2018⁴, пористость – по ГОСТ 12730.4-2020⁵, плотность – по ГОСТ 12730.1-2020⁶.

Влияние органических заполнителей и стеклянной фибры на физико-механические свойства гипсобетона. Свойства гипсобетонов в значительной степени зависят от вида, формы и размера частиц органического заполнителя. Опираясь на результаты исследований [9], в которых было установлено, что больший предел прочности на сжатие достигается при применении в составе опилкобетона более мелкой фракции опилок, для проведения эксперимента использовались древесные опилки, просеянные через сито с размером ячейки 5 мм. Содержание древесных опилок варьировалось с интервалом 2% и составляло 2%, 4%, 6%, 8%, 10% от массы гипсового вяжущего. Содержание костры льна – 1%, 2%, 4%, 6%, 8% от массы гипсового вяжущего. Содержание стеклянной фибры в составе гипсобетона принято 0,2%, 0,4%, 0,6% от массы гипсового вяжущего. Водогипсовое отношение во всех составах было принято постоянным и соответствовало нормальной густоте В/Г = 0,56. Для определения влияния органических заполнителей и стеклянной фибры на плотность и прочность гипсобетона изготавливались образцы-балочки 40×40×160 мм. Образцы набирали прочность в воздушно-сухих условиях при температуре 18–20 °С. Испытания проводились через 2 часа с момента затворения водой, в возрасте 7 суток и после высушивания образцов до постоянной массы при температуре 50±5 °С. Для сопоставления гипсобетонов по критерию прочности полученные результаты приводили к прочности контрольного образца (без органического заполнителя). Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

¹ ГОСТ 125–2018. Вяжущие гипсовые. Технические условия. Государственный стандарт Республики Беларусь. – М.: Стандартиформ, 2019. – 16 с.

² ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Государственный стандарт Республики Беларусь. – М.: Госстандарт, 2013. – 18 с.

³ ТУ ВУ 691581903.001–2018. Фибра стеклянная. – Минск, 2019. – 18 с.

⁴ ГОСТ 23789-2018. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний. Государственный стандарт Республики Беларусь. – М.: Госстандарт, 2019. – 18 с.

⁵ ГОСТ 12730.4-2020. Бетоны. Методы определения параметров пористости. Государственный стандарт Республики Беларусь. – М.: Госстандарт, 2021. – 14 с.

⁶ ГОСТ 12730.1-2020. Бетоны. Методы определения плотности. Государственный стандарт Республики Беларусь. – М.: Госстандарт, 2020. – 13 с.

Таблица 1. – Влияние органических заполнителей и стеклянной фибры на физико-механические свойства гипсобетона

Номер состава	Органиче- ский запол- нитель, % от $m_{з.в.}$		Стек- лянная фибра, % от $m_{з.в.}$	Плотность, кг/м ³			Прочность на растя- жение при изгибе, МПа (%)			Прочность на сжатие, МПа (%)			Водопо- глощение по массе, W_m , %	Общая пори- стость, %
	ДО	КЛ		в возрасте		сухих об- раз- цов	в возрасте		сухих об- раз- цов	в возрасте		сухих об- раз- цов		
				2 часа	7 суток		2 часа	7 суток		2 часа	7 суток			
1	-	-	-	2188	2000	1648	2,07 (100)	2,43 (100)	4,54 (100)	3,35 (100)	4,40 (100)	8,12 (100)	26,9	44,3
2	2	-		2162	1984	1617	2,04 (99)	2,43 (100)	4,25 (94)	3,29 (98)	4,39 (100)	8,02 (99)	27,9	45,1
3	4	-	-	2122	1979	1581	2,02 (98)	2,36 (97)	3,83 (84)	3,18 (95)	3,91 (89)	7,31 (90)	28,9	45,7
4	6	-	-	2115	1951	1575	2,01 (97)	2,29 (94)	3,70 (81)	3,05 (91)	3,69 (84)	5,18 (64)	30,4	47,9
5	8	-	-	2097	1898	1560	1,93 (93)	2,25 (93)	3,29 (72)	2,67 (80)	3,46 (79)	3,78 (47)	30,4	47,4
6	10	-	-	2055	1872	1557	1,87 (90)	2,24 (92)	2,30 (51)	2,15 (64)	2,54 (58)	2,96 (36)	31,2	48,6
7	-	1	-	2190	2008	1609	2,03 (98)	2,36 (97)	4,05 (89)	3,34 (100)	4,24 (96)	7,73 (95)	26,9	45,4
8	-	2	-	2122	1794	1563	2,01 (97)	2,30 (95)	3,23 (71)	3,26 (97)	3,82 (87)	6,25 (77)	26,9	46,6
9	-	4	-	2070	1688	1530	1,94 (94)	2,23 (92)	3,10 (68)	2,94 (88)	3,39 (77)	5,14 (63)	27,0	47,4
10	-	6	-	1947	1646	1484	1,85 (89)	2,13 (88)	2,98 (66)	2,74 (82)	2,84 (65)	4,93 (61)	27,1	48,4
11	-	8	-	1906	1599	1419	1,79 (86)	1,99 (82)	2,69 (59)	2,58 (77)	2,62 (60)	4,69 (58)	27,4	49,8
12	-	-	0,2	2172	2016	1646	2,09 (101)	2,45 (101)	4,93 (109)	3,40 (101)	4,38 (100)	8,29 (102)	26,9	37,7
13	-	-	0,4	2195	2076	1648	2,29 (111)	2,66 (109)	5,14 (113)	3,72 (111)	5,08 (115)	8,74 (112)	26,9	38,0
14	-	-	0,6	2255	2078	1651	2,64 (128)	2,74 (113)	5,30 (117)	3,91 (117)	5,50 (125)	9,47 (117)	26,9	38,3

Анализ полученных данных показал, что введение органических заполнителей приводит к уменьшению прочности гипсобетона по сравнению с контрольным составом без заполнителя. При содержании в составе гипсобетона древесных опилок в количестве 2%, 4%, 6%, 8%, 10% от массы гипсового вяжущего, снижение прочности на растяжение при изгибе через 2 часа после затворения водой составляет соответственно 1%, 2%, 3%, 7%, 10% по сравнению с контрольным составом, в возрасте 7 суток – 0%, 3%, 6%, 7%, 8% соответственно, сухих образцов – 6%, 19%, 19%, 28%, 49% соответственно. Введение в состав гипсобетона древесных опилок в количестве 2%, 4%, 6%, 8%, 10% от массы гипсового вяжущего привело к снижению прочности на сжатие по сравнению с контрольным составом без заполнителя через 2 часа на 2%, 5%, 9%, 20%, 36% соответственно, через 7 суток – на 0%, 11%, 16%, 21%, 42% соответственно, сухих образцов – на 1%, 10%, 36%, 53%, 64% соответственно.

Введение костры льна в количестве 1%, 2%, 4%, 6%, 8% приводит к снижению прочности на растяжение при изгибе через 2 часа после затворения водой на 2%, 3%, 6%, 11%, 14% соответственно по сравнению с контрольным составом, в возрасте 7 суток – на 3%, 5%, 8%, 12%, 18% соответственно, сухих образцов – на 11%, 29%, 32%, 34%, 41% соответственно. Введение в состав гипсобетона костры льна в количестве 1%, 2%, 4%, 6%, 8% от массы гипсового вяжущего привело к снижению прочности на сжатие по сравнению с контрольным составом без заполнителя через 2 часа на 0%, 3%, 12%, 18%, 23% соответственно, через 7 суток – на 4%, 13%, 23%, 35%, 40% соответственно, сухих образцов – на 5%, 13%, 34%, 39%, 42% соответственно. В целом, как и при введении древесных опилок, увеличение количества костры льна приводит к снижению как прочности на растяжение при изгибе, так и прочности при сжатии. При этом прочность на сжатие снижается больше, чем прочность на растяжение при изгибе. Содержание в составе гипсобетона костры льна в количестве 1% и 2% от массы гипсового вяжущего практически не оказывает влияния на раннюю прочность гипсобетона в возрасте 2 часов.

При содержании костры льна в количестве от 4 до 8% от массы гипсового вяжущего в возрасте 2 часов снижение прочности на сжатие было в 1,6–2 раза выше, чем снижение прочности на растяжение при изгибе, а в возрасте 7 суток – выше в 2,2–2,9 раза. Снижение прочности на растяжение при изгибе и прочности на сжатие сухих образцов при содержании костры льна в количестве от 4 до 8% от массы гипсового вяжущего имеет сопоставимые значения и находится в пределах 32–42%.

При содержании в количестве 2% от массы гипсового вяжущего прочность на сжатие сухих образцов гипсобетона с кострой льна снизилась на 13%, с древесными опилками – на 1% по сравнению с прочностью контрольного образца без заполнителя, прочность на растяжение при изгибе сухих образцов с кострой льна снизилась на 29%, с древесными опилками – на 6% по сравнению с прочностью контрольного образца без заполнителя. В процессе приготовления гипсобетонной смеси отмечалось большее снижение пластичности у гипсобетонной смеси с древесным заполнителем. При добавлении костры льна в гипсовое тесто в исследуемом диапазоне дозировок подвижность не изменялась.

Величина снижения прочности гипсобетона, в процентах, в зависимости от количества органического заполнителя может быть определена по математическим зависимостям, представленным в таблице 2. Полученные значения коэффициентов детерминации (R^2) свидетельствуют о высокой степени соответствия полученных математических моделей экспериментальным данным.

Таблица 2. – Математические зависимости величины снижения прочности гипсобетона, в процентах, в зависимости от количества органического заполнителя

Вид и количество органического заполнителя в составе гипсобетона	Продолжительность твердения	Математические зависимости величины снижения прочности (в процентах)	
		на растяжение при изгибе	на сжатие
древесные опилки, от 2% до 10% от массы гипсового вяжущего	2 часа	$y = 0,5x^2 - 0,7x + 1,2$ ($R^2 = 0,986$)	$y = 2,3571x^2 - 5,8429x + 6$ ($R^2 = 0,9967$)
	7 суток	$y = -0,4286x^2 + 4,5714x - 4,2$ ($R^2 = 0,9947$)	$y = 1,4286x^2 + 0,8286x - 0,2$ ($R^2 = 0,9482$)
	в сухом состоянии	$y = 1,7857x^2 - 1,2143x + 8,2$ ($R^2 = 0,9333$)	$y = 16,9x - 17,9$ ($R^2 = 0,9772$)
костра льна, от 1% до 8% от массы гипсового вяжущего	2 часа	$y = 3,2x - 2,4$ ($R^2 = 0,9588$)	$y = 6,1x - 7,1$ ($R^2 = 0,9823$)
	7 суток	$y = 3,7x - 1,9$ ($R^2 = 0,9587$)	$y = 9,5x - 5,7$ ($R^2 = 0,9866$)
	в сухом состоянии	$y = 17,1\ln(x) + 13,026$ ($R^2 = 0,9426$)	$y = -1,8571x^2 + 21,143x - 16,4$ ($R^2 = 0,9554$)

Анализ результатов эксперимента показывает, что к большему снижению плотности приводит введение в состав гипсобетона в качестве заполнителя костры льна. В возрасте 2 часов плотность гипсобетона с древесными опилками в количестве 2% от массы гипсового вяжущего снизилась на 1,2% по сравнению с контрольным составом без заполнителя и составила 2162 кг/м³, с кострой льна в таком же количестве плотность гипсобетона составила 2122 кг/м³, что меньше плотности гипсобетона контрольного состава на 3%. В возрасте 7 суток плотность гипсобетона с древесными опилками и кострой льна в количестве 2% от массы гипсового вяжущего составляла соответственно 1984 кг/м³ и 1794 кг/м³, что меньше плотности гипсобетона контрольного состава (2000 кг/м³) соответственно на 0,8% и 10,3%.

Плотность сухого гипсобетона с древесными опилками и кострой льна в количестве 2% от массы гипсового вяжущего составляла соответственно 1617 кг/м³ и 1563 кг/м³, что меньше плотности сухого гипсобетона контрольного состава (1648 кг/м³) соответственно на 1,9% и 5,2%. При введении органического заполнителя в количестве 8% от массы гипсового вяжущего плотность сухого гипсобетона с древесными опилками составляла 1560 кг/м³, с кострой льна – 1419 кг/м³, что меньше плотности сухого гипсобетона контрольного состава (1648 кг/м³) соответственно на 5,3% и 13,9%.

В первые 7 суток более активно высыхает гипсобетон с кострой льна. Образцы гипсобетона с органическим заполнителем в количестве от 2% до 8% от массы гипсового вяжущего потеряли в массе от 15,5% до 18,5% при использовании костры льна, от 6,7% до 9,5% при использовании в качестве заполнителя древесных опилок.

Результаты определения плотности гипсобетона с органическим заполнителем после сушки образцов при температуре 50±5 °С, которая проводилась спустя 7 суток твердения в воздушно-сухих условиях, показали, что более высокий процент влажности был у образцов гипсобетона с древесными опилками. Образцы гипсобетона с органическим заполнителем в количестве от 2% до 8% от массы гипсового вяжущего потеряли в массе после сушки от 16,8% до 21,1% при использовании в качестве заполнителя древесных опилок и от 9,4% до 12,9% при использовании костры льна.

Водопоглощение гипсового камня составило 26,9%. Введение в состав гипсобетона древесных опилок в количестве от 2% до 10% от массы гипсового вяжущего приводит к увеличению водопоглощения от 4% до 16%. Введение в состав гипсобетона костры льна в количестве от 1% до 8% практически не влияет на водопоглощение. Максимальное повышение водопоглощения на 0,5% получено при введении костры льна в количестве 8% от массы гипсового вяжущего, при меньшем количестве костры льна в составе гипсобетона водопоглощение практически

равно значению для гипсобетона контрольного состава. Максимальное значение водопоглощения, которое составило 31,2%, получено для гипсобетона с древесными опилками в количестве 10% от массы гипсового вяжущего и 27,4% для гипсобетона с кострой льна в количестве 8% от массы гипсового вяжущего.

При увеличении количества органического заполнителя в составе гипсобетона увеличивалось количество пор на поверхности образцов. Пористость гипсового камня без заполнителя составила 44,3%. При введении в состав гипсобетона древесных опилок в количестве от 2% до 10% от массы гипсового вяжущего пористость увеличивается от 1,8% до 9,7%, при введении льняной костры в количестве от 1% до 8% пористость увеличивается от 2,5% до 12,4%. Максимальное значение пористости составило 49,8% для гипсобетона с кострой льна в количестве 8% от массы гипсового вяжущего и 48,6% для гипсобетона с опилками в количестве 10% от массы гипсового вяжущего.

Результаты показали, что введение стеклянной фибры приводит к увеличению прочности гипсового камня по сравнению с контрольным составом. Введение стеклянной фибры в количестве 0,2%, 0,4%, 0,6% привело к увеличению прочности на растяжение при изгибе через 2 часа на 1%, 11%, 28% соответственно, через 7 суток – на 1%, 9%, 13% соответственно, высушенных образцов – на 9%, 13%, 17% соответственно. Введение стеклянной фибры в количестве 0,2%, 0,4%, 0,6% привело к увеличению прочности на сжатие через 2 часа на 1%, 11%, 17% соответственно, через 7 суток – на 0%, 15%, 25% соответственно, высушенных образцов – на 2%, 12%, 17% соответственно.

Введение стеклянной фибры в количестве 0,2%, 0,4%, 0,6% приводит к увеличению значения плотности с увеличением количества стеклянной фибры. Плотность сухих образцов гипсобетона со стеклянной фиброй близка к значениям плотности контрольного образца без фибры.

Введение стеклянной фибры в состав гипсобетона не влияет на водопоглощение гипсового камня. Введение стеклянной фибры в количестве 0,2%, 0,4%, 0,6% привело к незначительному увеличению пористости на 0%, 1%, 1% соответственно.

Влияние органических заполнителей и стеклянной фибры на водостойкость гипсобетона. Для определения водостойкости, характеризующейся коэффициентом размягчения, определялись прочность на растяжение при изгибе и прочность на сжатие сухих и насыщенных водой образцов. Экспериментальные исследования проводились на образцах-балочках 40×40×160 мм. Коэффициент размягчения был определен как отношение прочности насыщенных водой образцов с органическим заполнителем к прочности сухих образцов с органическим заполнителем (K_p), а также как отношение прочности насыщенных образцов с органическим заполнителем к прочности сухих образцов без органического заполнителя (K_p^k). Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Влияние содержания органических заполнителей на водостойкость гипсобетона

Номер состава	Органический заполнитель, % от $m_{г.в.}$		Стеклянная фибра, % от $m_{г.в.}$	Прочность образцов на растяжение при изгибе, МПа		Коэффициент размягчения по прочности на растяжение при изгибе		Прочность образцов на сжатие, МПа		Коэффициент размягчения по прочности на сжатие	
	ДО	КЛ		высушенных при 50±5 °C ($R_{и}^{сух}$)	насыщенных водой ($R_{и}^{нас}$)	$K_{p,изг.}^{нас} = \frac{R_{и}^{нас}}{R_{и}^{сух}}$	$K_{p,изг.}^k = \frac{R_{и}^{нас}}{R_{и}^{сух,k}}$	высушенных при 50±5 °C ($R_{сж}^{сух}$)	насыщенных водой ($R_{сж}^{нас}$)	$K_{p,сж.}^{нас} = \frac{R_{сж}^{нас}}{R_{сж}^{сух}}$	$K_{p,сж.}^k = \frac{R_{сж}^{нас}}{R_{сж}^{сух,k}}$
1	-	-	-	4,54	2,27	0,50	0,50	8,12	3,95	0,49	0,49
2	2	-	-	4,25	2,00	0,47	0,44	8,02	3,27	0,41	0,40
3	4	-	-	3,83	1,92	0,49	0,42	7,31	2,94	0,40	0,36
4	6	-	-	3,70	1,80	0,50	0,40	5,18	2,37	0,46	0,29
5	8	-	-	3,29	1,73	0,53	0,38	3,78	2,27	0,60	0,28
6	10	-	-	2,30	1,69	0,73	0,37	2,96	2,13	0,72	0,26
7	-	1	-	4,05	2,00	0,48	0,44	7,73	2,98	0,44	0,37
8	-	2	-	3,23	1,97	0,63	0,43	6,25	2,70	0,39	0,33
9	-	4	-	3,10	1,89	0,63	0,42	5,14	2,45	0,48	0,30
10	-	6	-	2,98	1,86	0,68	0,41	4,93	2,18	0,43	0,27
11	-	8	-	2,69	1,75	0,75	0,39	4,69	2,14	0,46	0,26
12	-	-	0,2	4,93	2,37	0,48	0,52	8,29	4,18	0,50	0,51
13	-	-	0,4	5,14	2,51	0,49	0,55	8,74	4,31	0,49	0,53
14	-	-	0,6	5,30	2,68	0,51	0,59	9,47	4,81	0,51	0,59

Значение коэффициента размягчения (K_p) по прочности на растяжение при изгибе изменяется от 0,47 до 0,73 при введении древесных опилок в состав гипсобетона в количестве от 2% до 10% от массы гипсового вяжущего

и от 0,48 до 0,75 при введении костры льна в состав гипсобетона в количестве от 1% до 8% от массы гипсового вяжущего. Более информативным является коэффициент размягчения по контрольному составу гипсобетона ($K_{p.}^k$). Определение коэффициента ($K_{p.}^k$) по прочности на растяжение при изгибе показало, что увеличение количества органического заполнителя в составе гипсобетона приводит к снижению коэффициента размягчения. Значение коэффициента размягчения ($K_{p.}^k$) снижается от 0,50 для контрольного состава до 0,37 для состава, содержащего древесные опилки в количестве 10% от массы гипсового вяжущего, и до 0,39 для состава, содержащего костру льна в количестве 8% от массы гипсового вяжущего.

Анализ значений коэффициента размягчения ($K_{p.}^k$) по прочности на сжатие показывает, что значение коэффициента размягчения для контрольного состава, равное 0,49, уменьшается при введении в состав гипсобетона как древесных опилок, так и костры льна и достигает минимального значения при количестве органических заполнителей соответственно 10% и 8% от массы гипсового вяжущего.

При величине коэффициента размягчения $0,45 < K_{p.} < 0,6$ гипсовые вяжущие относятся к средней водостойкости, при величине коэффициента размягчения $K_{p.} < 0,45$ гипсовые вяжущие относятся к неводостойким. Таким образом установлено, что введение органических заполнителей в состав гипсобетона снижает его устойчивость к влажной среде.

Значение коэффициента размягчения ($K_{p.}$) по прочности на растяжение при изгибе при добавлении стеклянной фибры в состав гипсовой композиции изменяется от 0,48 до 0,51. Значение коэффициента размягчения ($K_{p.}$) по прочности на сжатие при добавлении стеклянной фибры в состав гипсовой композиции изменяется от 0,49 до 0,51. Значение коэффициента размягчения по контрольному составу ($K_{p.}^k$) по прочности на растяжение при изгибе увеличивается от 0,50 для контрольного состава до 0,59. Значение коэффициента размягчения по контрольному составу ($K_{p.}^k$) по прочности на сжатие увеличивается от 0,49 для контрольного состава до 0,59.

Заключение. Введение органических заполнителей в состав гипсобетона приводит к снижению прочностных показателей, при этом прочность на сжатие снижается больше, чем прочность гипсобетона на растяжение при изгибе. При одинаковом содержании в составе гипсобетона, по сравнению с древесными опилками, костра льна приводит к большему снижению как прочности гипсобетона на растяжение при изгибе, так и прочности на сжатие. Более низкая прочность может быть объяснена тем, что костра льна имеет гладкую малопористую поверхность, поэтому можно предположить, что степень сцепления с гипсовым камнем будет иметь более низкие значения, чем сцепление с древесными опилками, которые отличаются пористой структурой и лучшей смачиваемостью.

Установлено, что величина снижения прочностных показателей гипсобетона с органическими заполнителями зависит от продолжительности твердения и увеличивается с увеличением времени твердения образцов гипсобетона, достигая максимальных значений для сухих образцов. Влажность после 7 суток твердения в воздушно-сухих условиях у гипсобетона с древесными опилками составляла 16,8–21,1%, у гипсобетона с кострой льна – 9,4–12,9%. Введение древесных опилок в количестве 10% от массы гипсового вяжущего приводит к снижению прочности на растяжение при изгибе гипсобетона в сухом состоянии на 49%, прочности на сжатие – на 64%. Введение костры льна в количестве 8% от массы гипсового вяжущего приводит к снижению прочности на растяжение при изгибе гипсобетона в сухом состоянии на 41%, прочности на сжатие – на 42%.

Эффективность применения органических заполнителей в гипсобетоне может быть повышена при использовании совместно со стеклянной фиброй. Определено, что стеклянная фибра при содержании от 0,2% до 0,6% от массы гипсового вяжущего повышает прочность гипсобетона в возрасте 7 суток до 25%, в сухом состоянии – до 17%. При этом водопоглощение гипсобетона не изменяется, увеличение пористости не превысило 0,5% по сравнению с гипсобетоном без фибрового армирования, коэффициент размягчения повысился с 0,49 до 0,51...0,59.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наназашвили И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. – Л.: Стройиздат, 1990. – 415 с.
2. Суровцева Л.С., Шунина М.А. Анализ фракционного состава опилок при раскросе пиловочного сырья // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. – 2013. – № 205. – С. 153–161.
3. Тарануха В.Г., Камасин С.С., Пугач А.А. Растениеводство. Прядильные культуры: учеб.-метод. пособие. – Горки: БГСХА, 2020. – 51 с.
4. Смирнова О.Е. Влияние фракционного состава костры льна на свойства прессованного материала // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строит. комплексе региона. – 2018. – № 10. – С. 153–156.
5. Русина В.В., Дубровина Ю.Ю., Чернов Е.И. Бетоны для ограждающих конструкций на основе отходов механической переработки древесины // Строит. материалы. – 2017. – № 9. – С. 32–35.
6. Наназашвили И.Х., Соколов А.А., Марченков Р.А. Древесные отходы – вторая жизнь. Арболитовые стеновые блоки // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2011. – № 7. – С. 24–25.
7. Бозылев В.В., Ягубкин А.Н. Инновационный арболит с заданными свойствами = Innovative Arbolit with Desired Properties // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / редкол.: М.Ф. Марковский (пред.) и др. – Минск: Колорград, 2017. – Вып. 9. – С. 96–112.
8. Теоретические основы получения древесногипсовых композитов с заданными эксплуатационными свойствами / А.А. Лукаш, Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин и др. – Курск: Университет. кн., 2023. – 109 с.
9. Долматов С.Н. Влияние фракционного состава опилок на прочностные свойства облитобетона // Решетневские чтения. – 2016. – С. 306–308.

REFERENCES

1. Nanazashvili, I.Kh. (1990). *Stroitel'nye materialy iz drevesno-tsementnoi kompozitsii*. Leningrad: Stroizdat. (In Russ.).
2. Surovtseva, L.S. & Shunina, M.A. (2013). Analiz fraktsionnogo sostava opilok pri raskroe pilovochnogo syr'ya [Analysis of the fractional composition of sawdust when cutting sawdust]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii [Bulletin of the St. Petersburg Forestry Academy]*, (205), 153–161. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Taranukho, V.G., Kamasin, S.S. & Pugach, A.A. (2020). *Rastenievodstvo. Pryadil'nye kul'tury: ucheb.-metod. posobie*. Gorki: BGSKhA. (In Russ.).
4. Smirnova, O.E. (2018). Vliyanie fraktsionnogo sostava kostry l'na na svoystva pressovannogo materiala. *Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona*, (10), 153–156. (In Russ.).
5. Rusina, V.V., Dubrovina, Yu.Yu. & Chernov E.I. (2017). Betony dlya ograzhdayushchikh konstruksii na osnove otkhodov mekhanicheskoi pere-rabotki drevesiny [Concretes for enclosing structures based on the waste of mechanical wood processing]. *Stroitel'nye materialy [Building materials]*, (9), 32–35. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Nanazashvili, I.Kh., Sokolov, A.A. & Marchenkov, R.A. (2011). Drevesnye otkhody – vtoraya zhizn'. Arbolitovye stenovye bloki [Wood waste – a second life. Arbolite wall blocks]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie i tekhnologii XXI veka [Building materials, equipment and technologies of the XXI century]*, (7), 24–25. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Bozylev, V.V. & Yagubkin, A.N. (2017). Innovatsionnyi arbolit s zadannymi svoystvami = Innovative Arbolit with Desired Properties. In M.F. Markovskii (Eds.). *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: Vyp. 9. [Problems of modern concrete and reinforced concrete (Vol. 9)]* (96–112). Minsk: Kolorgrad. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Lukash, A.A., Lukutsova, N.P., Pykin, A.A., Litvinchev, K.A. & Chernyshev, O.N. (2023). *Teoreticheskie osnovy polucheniya drevesnogipsovykh kompozitov s zadannymi ekspluatatsionnymi svoystvami*. Kursk: Universitetskaya kniga. (In Russ.).
9. Dolmatov, S.N. (2016). Vliyanie fraktsionnogo sostava opilok na prochnostnye svoystva oblikobetona [Influence of the fractional composition of sawdust on the strength properties of shaped concrete]. *Reshetnevskie chteniya [Reshetnevsky readings]*, 306–308. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 15.11.2023

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GYPSUM CONCRETE BASED ON LOW-QUALITY GYPSUM BINDER WITH ORGANIC FILLER

Y. MATSKEVICH¹⁾, L. PARFENOVA²⁾, L. ZAKREVSKAYA³⁾

^(1), 2)Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,

³⁾Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs)

The article presents the results of studies of the physical and mechanical properties of gypsum concrete with organic filler, which were considered sawdust and flax shreds. It has been shown that the introduction of organic fillers into gypsum concrete leads to a decrease in strength indicators, density, softening coefficient, and an increase in porosity and water absorption. It is noted that the properties of gypsum concrete with sawdust and flax fire are different. With the same amount of organic fillers in the composition of gypsum concrete, flax fire gives a greater reduction in strength, density, softening coefficient and porosity. Flax burning does not change the mobility of the original gypsum concrete mixture and does not affect the water absorption of gypsum concrete. Gypsum concrete with flax kernels loses moisture faster when hardening in air-dry conditions, which will reduce energy costs for drying products. It has been shown that the efficiency of using organic aggregates in gypsum concrete can be increased when used in conjunction with glass fiber.

Keywords: gypsum binder, organic fillers, sawdust, flax fire, glass fiber, gypsum concrete, physical and mechanical properties.

УДК 69.059

DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-41-47

ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЗДАНИЯ БЫВШЕЙ ЛЬНОПРЯДИЛЬНОЙ ФАБРИКИ НАЧАЛА XX В. В ВИТЕБСКЕ

канд. техн. наук, доц. Р.М. ПЛАТОНОВА¹⁾, М.А. ПЛАТОНОВА²⁾, А.Т. ЗЕЛЕНКОВ³⁾
(^{1), 2)}Белорусский национальный технический университет, Минск, ³⁾«САЛЮС», Новополоцк)
¹⁾ORCID <https://orcid.org/0009-0003-5747-4426>, ²⁾ORCID <https://orcid.org/0009-0001-4967-6883>
¹⁾platonowarm54@mail.ru, ²⁾platonovam@bntu.by, ³⁾firmasalus@mail.ru

В статье приводится анализ объемно-планировочного и конструктивного решений здания производства тканых ковровых изделий (ПТКИ), построенного в начале XX века в Витебске. На основании визуального и инструментального обследований строительных конструкций, поверочных расчетов и анализа полученных результатов сделаны выводы о техническом состоянии конструкций и даны рекомендации, необходимые для дальнейшей реконструкции и надежной эксплуатации объекта. Реконструкция исторического здания промышленной архитектуры поможет сохранить его для будущих поколений.

Ключевые слова: ковровый комбинат, льнопрядильная фабрика, техническое обследование, строительные конструкции, перекрытие, фундамент, стены, рекомендации, реконструкция.

Введение. Проведенное обследование технического состояния несущих строительных конструкций здания производства тканых ковровых изделий (ПТКИ) с целью дальнейшей реконструкции и сохранения его для будущих поколений Республики Беларусь является актуальной задачей.

Здание ПТКИ можно в полной мере отнести к лучшим образцам исторического наследия промышленной архитектуры, так как в силу различных причин очень мало таких объектов сохранилось на территории нашей республики.

История создания ОАО «Витебские ковры» началась в конце XIX века, с 15 ноября 1898 года, когда в одном из центров бельгийского предпринимательства – старом Генте состоялось учредительное собрание будущих акционеров «Русско-бельгийского анонимного общества Витебской Льнопрядильной фабрики». Учредителей нового акционерного общества поддержали чиновники судебной палаты г. Санкт-Петербурга и царь Николай II. Он издал «высочайший» указ 29 мая 1899 года, по которому предпринимателям предоставлялись широкие полномочия на строительство и эксплуатацию новой льнопрядильной фабрики «Двина». Возведение фабричных корпусов завершилось в конце второго года подрядного договора. 25 ноября (7 декабря по новому стилю) 1900 года предприятие выдало первые пуды льняной пряжи. Этот день считается датой основания предприятия. Капитал акционерного общества составлял 2 млн франков. В 1900 году на фабрике работало 453 рабочих, в 1906 году – 990 рабочих, в 1910 – 1054 человека. Предприятие было оснащено по тем временам новейшим зарубежным оборудованием: 70 разнообразных станков и машин для обработки льна-сырца, 3 паровые машины. Фабрика первой в Витебской губернии получила электрическое освещение. Вся губерния поставляла свыше 900 тыс. пудов льноволокна, из них 50–60 тыс. пудов – фабрика «Двина». Квалифицированных рабочих и мастеров вербовали в Нижегородской, Ярославской, Курской и Могилевской губерниях [1–2]. После Октябрьской революции фабрика была национализирована. Во 2-ой пятилетке (1933–37 гг.) главной задачей было завершение технической реконструкции народного хозяйства, в Витебске льнопрядильная фабрика «Двина» находилась в стадии реконструкции. Выполнить все планы помешала Великая Отечественная война, по завершении которой в марте 1946 года СНК СССР принял решение по открытию на базе льнопрядильной фабрики «Двина» Витебского коврово-плюшевого комбината. Новый комбинат был создан на оборудовании, вывезенном по репарации из Германии. Монтаж станков начался в августе 1946 года, а через год были выпущены первые метры ковровой дорожки «Букле» и плюша. 5 ноября 1947 года была пущена первая очередь коврово-плюшевого комбината. В 1957–1961 годах на комбинате была осуществлена реконструкция и расширение производств. Взамен старых станков выполнили монтаж 43-х английских аксминстерских коврово-ткацких станков с комплектующим их оборудованием. В настоящее время комбинат входит в состав Белорусского государственного концерна легкой промышленности¹ [3; 4].

Основная часть. Обследуемое здание – производство тканых ковровых изделий (ПТКИ) построено в 1903 году, расположено по адресу: ул. М. Горького, 75 в г. Витебске.

Краткая техническая характеристика здания. Объект имеет сложную форму в плане с внутренним двориком (рисунок 1).

Обследуемая часть здания состоит из двух производственных корпусов (А и Б) с пристройками разной высоты, примыкающих к продольным наружным внешним стенам здания (рисунки 2–4). Подвал под зданием отсутствует. За «нулевую» отметку принята отметка чистого пола 1-го этажа производственных корпусов А и Б.

¹ Витебские ковры. Историческая справка. 2020 [Электронный ресурс]. URL: https://vitcarpet.by/?page_id=2084 (дата обращения 25.04.2020).

Производственный корпус А.

Общие размеры корпуса 67,74×20,56 м. Высота помещений: 1-ый этаж – 3,65 м; 2-ой этаж – 3,63 м. На 2-ой этаж у оси 1 в осях А-В устроена лестница. Здание кирпичное, двухэтажное, трехпролетное с неполным стальным каркасом и светоаэрационным фонарем. По оси А к зданию примыкают одно-двухэтажные пристройки разной высоты.

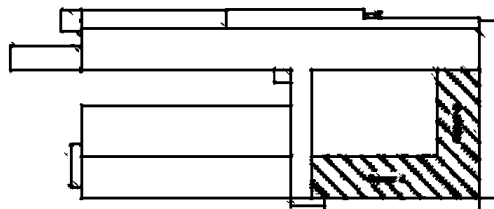
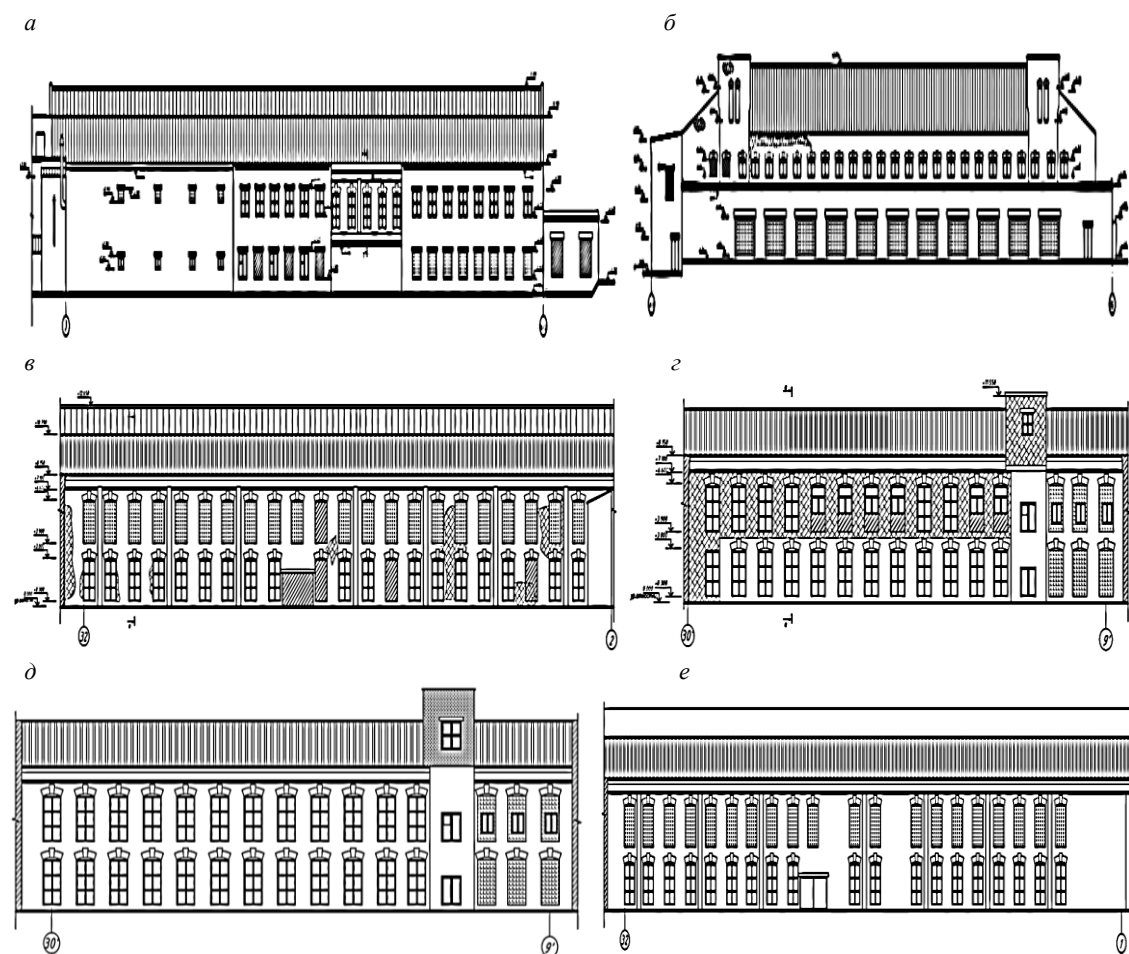


Рисунок 1. – План-схема здания ПТКИ

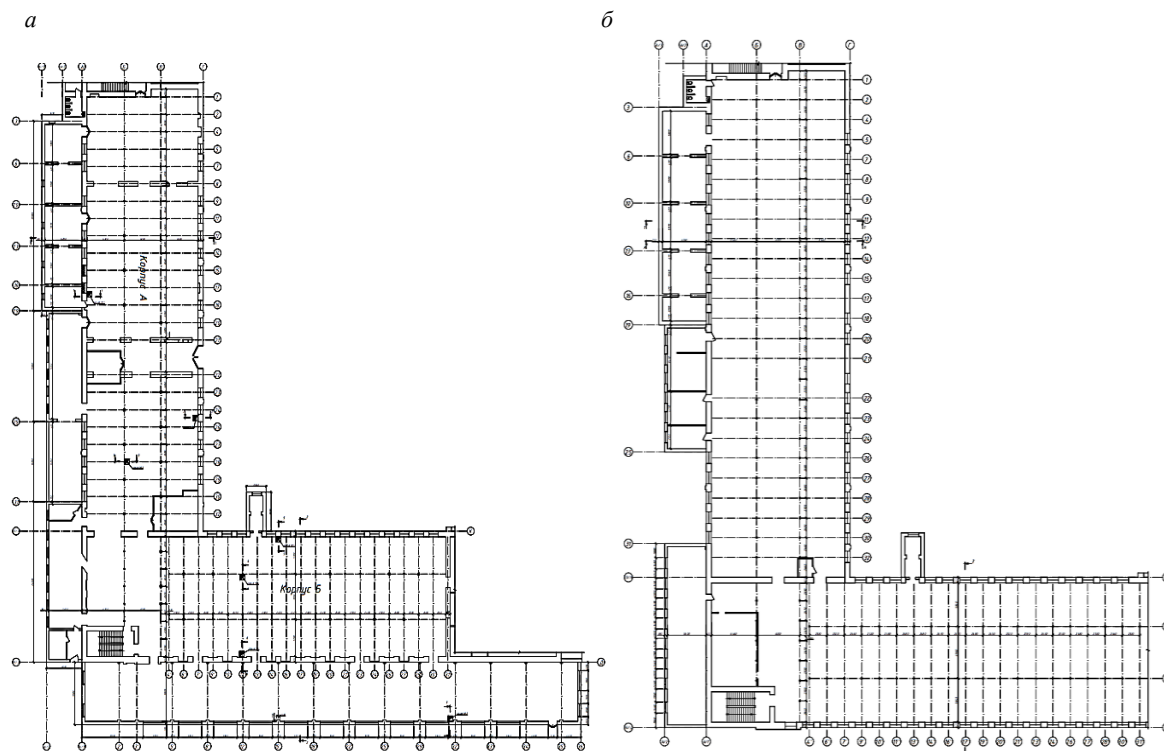


a – в осях 3-34/Д; *б* – в осях А/2-36; *в* – в осях 32-2;
г – в осях 30'-9; *д* – в осях 30'-36'; *е* – в осях 32-1

Рисунок 2. – Фасады здания ПТКИ



Рисунок 3. – Общие виды здания ПТКИ



a – первый этаж; *б* – второй этаж

Рисунок 4. – Планы этажей здания ПТКИ

Фундаменты: под наружные и внутренние несущие стены – ленточные, бутобетонные с кирпичным цоколем; под колонны каркаса – столбчатые, бутобетонные. Наружные стены основного здания из керамического полнотелого кирпича, оштукатуренные с двух сторон. Толщина стен 850–870 мм. Внутренние несущие стены кирпичные, толщиной 690–720 мм с последующей штукатуркой с двух сторон.

Неполный стальной каркас состоит из колонн, главных и второстепенных балок прокатного профиля заводского изготовления. Колонны 1-го и 2-го этажей круглого трубчатого сечения Ø 195 мм с толщиной стенки 17 мм. Высота колонн 3,6 м. Шаг колонн 2620÷2700 мм.

Главные балки: перекрытие 1-го этажа из двутавра высотой 340 мм с шириной полок 137 мм; перекрытие 2-го этажа из двутавра высотой 300 мм с шириной полок 125 мм. Главные балки опираются на колонны и располагаются вдоль здания.

Второстепенные балки: перекрытие 1-го этажа из двутавра высотой 300 мм с шириной полок 125 мм (шаг балок 880÷890 мм); перекрытие 2-го этажа из двутавра высотой 230 мм с шириной полок 102 мм (шаг балок 2620÷2700 мм). Второстепенные балки опираются в среднем пролете на нижние полки главных балок и крепятся к главным балкам при помощи уголков на болтах. В крайних пролетах балки опираются на главные балки и на наружные продольные стены.

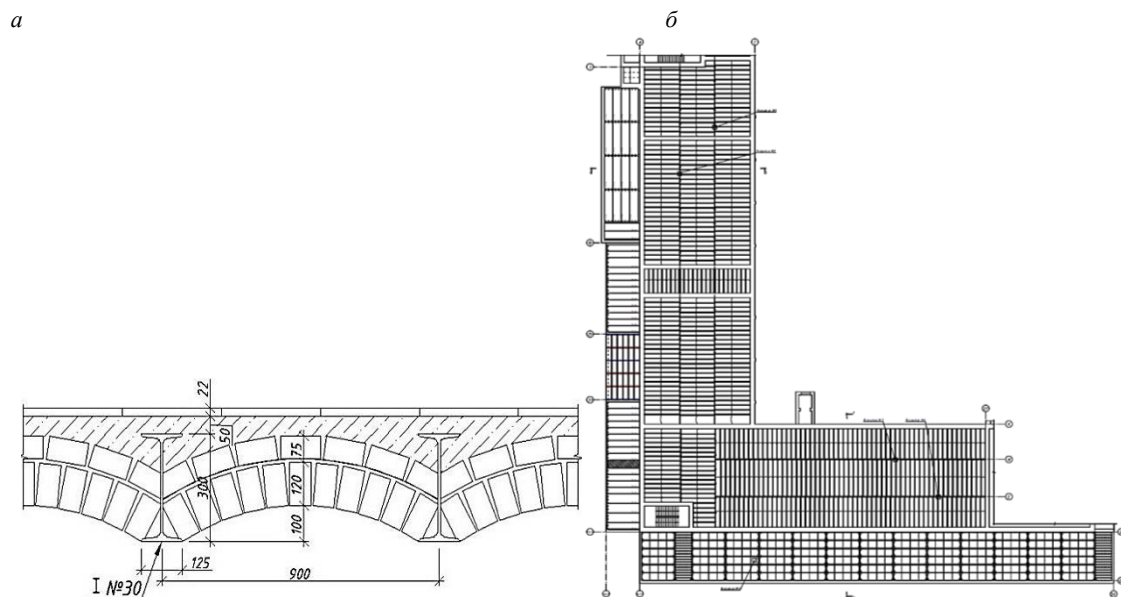
Для обеспечения пространственной жесткости здания и связи неполного стального каркаса с наружными продольными стенами устроены тяжи. Тяжи располагаются в уровне перекрытий 1-го и 2-го этажей по простенкам и крепятся к второстепенным балкам. Крепление тяжей к стенам выполнено при помощи упорных ребристых элементов и гаек. Диаметр тяжей 25 мм.

План-схема перекрытия над 1-м этажом представлена на рисунке 5, *a*. Междуетажное перекрытие выполнено в виде кирпичных цилиндрических сводов, опирающихся на второстепенные балки перекрытия (рисунок 5, *б*).

Чердачное перекрытие выполнено в виде железобетонных цилиндрических сводов, опирающихся на второстепенные балки перекрытия. Крыша с деревянной стропильной системой и холодным чердаком. Утеплитель чердачного перекрытия – котельный шлак, толщиной 150 мм. Кровля: в осях А-Б – профнастил по ранее существующей кровельной стали; в осях В-Г из волнистых асбоцементных листов. Разрезы 1-1 и 2-2 даны на рисунке 6.

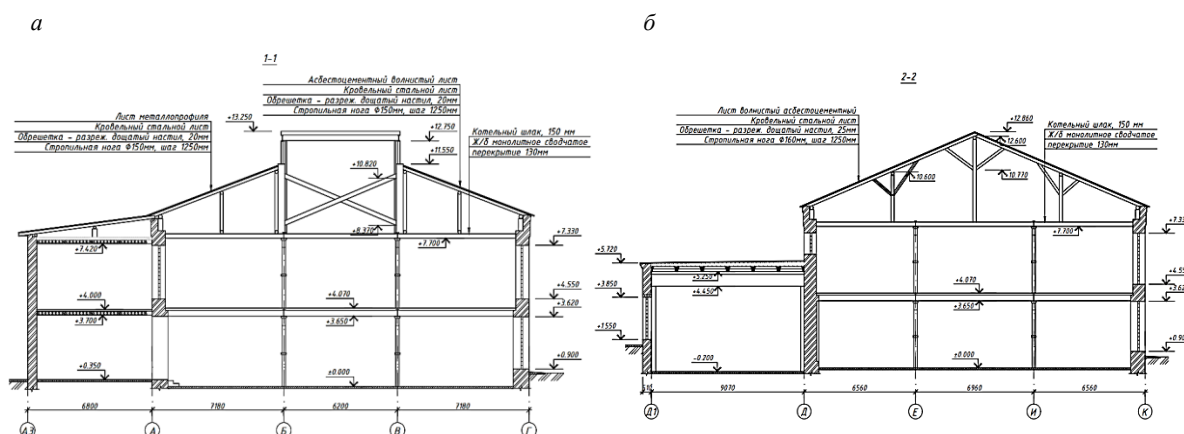
Остальные конструктивные элементы корпуса А: полы – цементно-песчаная стяжка, резино-битумная и металлическая плитка; заполнение оконных проемов – деревянные блоки с двойным раздельным остеклением; двери и ворота деревянные, металлические.

Светоаэрационный фонарь располагается в среднем пролете по всей длине здания. Высота фонаря 4,75 м. Колонны фонаря выполнены из стального профиля сложного сечения (рисунок 7).



a – над 1-м этажом; *б* – перекрытие корпуса А

Рисунок 5. – План-схема перекрытия и конструктивное решение междуэтажного перекрытия



a – разрез 1-1; *б* – разрез 2-2

Рисунок 6. – Разрезы здания ПТКИ

Шаг колонн фонаря $2620 \div 2700$ мм. По наружным граням в верхней части колонн (вдоль всего здания) устроены стальные связи из двутавра высотой 180 мм с шириной полок 80 мм. Балки фонаря выполнены из двутавра высотой 230 мм с шириной полок 102 мм. Шаг балок $2620 \div 2700$ мм. По центру фонаря, по всей длине здания, между балками установлен тяж $\varnothing 20$ мм. Наружные стены фонаря, толщиной 380 мм, выполнены из полнотелого керамического кирпича с последующей штукатуркой с внутренней стороны.

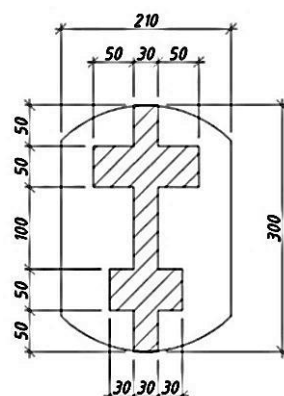


Рисунок 7. – Конструкция колонн фонаря

Для обеспечения пространственной жесткости в уровне фонаря между колоннами устроены крестовые связи. Связи выполнены из двутавра высотой 230 мм с шириной полок 102 мм.

Соединение элементов выполнено на болтах. Покрытие фонаря выполнено в виде монолитных железобетонных цилиндрических сводов, толщиной 100 мм, опирающихся на балки фонаря. Крыша совмещенная с кровлей из рубероида на битумной мастике (рисунок 8).

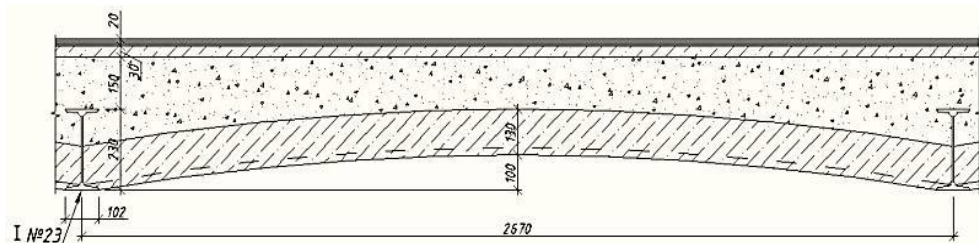


Рисунок 8. – Конструктивное решение покрытия фонаря корпуса А

Корпус А имеет пристройки: двухэтажные в осях 3-19/А3-А, 19-25/А2, А31-32/А2-А и одноэтажную в осях 25-31/А2-А, которые также обследовались.

Производственный корпус Б.

Общие размеры корпуса 62,95×20,08 м. Высота помещений: 1-ый этаж – 3,65 м; 2-ой этаж – 3,63 м. Для доступа на 2-ой этаж в осях 1'-3'/Е-Д устроена лестница. Здание кирпичное, двухэтажное, трехпролетное с неполным стальным каркасом. По оси Д к зданию примыкает одноэтажная пристройка.

Фундаменты: под наружные и внутренние несущие стены – ленточные, бутобетонные с кирпичным цоколем; под колонны каркаса – столбчатые, бутобетонные. Наружные стены основного здания из керамического полнотелого кирпича, оштукатуренные с двух сторон. Толщина стен 850–870 мм. Внутренние несущие стены кирпичные, толщиной 690–720 мм с последующей штукатуркой с двух сторон.

Неполный стальной каркас состоит из колонн и главных и второстепенных балок из прокатных профилей заводского изготовления. Колонны 1-го и 2-го этажей круглого трубчатого сечения Ø 195 мм с толщиной стенки 17 мм. Высота колонн 3,6 м. Шаг колонн 2450–2500 мм.

Главные балки: перекрытие 1-го этажа из двутавра высотой 340 мм с шириной полок 137 мм; перекрытие 2-го этажа из двутавра высотой 300 мм с шириной полок 125 мм. Главные балки опираются на колонны и располагаются вдоль здания.

Второстепенные балки: перекрытие 1-го этажа из двутавра высотой 300 мм с шириной полок 125 мм (шаг балок 840÷850 мм); перекрытие 2-го этажа из двутавра высотой 230 мм с шириной полок 102 мм (шаг балок 2450–2500 мм). Второстепенные балки опираются в среднем пролете на нижние полки главных балок и крепятся к главным балкам при помощи уголков на болтах. В крайних пролетах балки опираются на главные балки и на наружные продольные стены.

Для обеспечения пространственной жесткости здания и связи неполного стального каркаса с наружными продольными стенами устроены тяжи. Тяжи располагаются в уровне перекрытий 1-го и 2-го этажей по про стенкам, и крепятся к второстепенным балкам. Крепление тяжей к стенам выполнено при помощи упорных ребристых элементов и гаек. Диаметр тяжей 25 мм.

Междуэтажное перекрытие выполнено в виде кирпичных цилиндрических сводов, опирающихся на второстепенные балки перекрытия (рисунок 9). Чердачное перекрытие выполнено в виде железобетонных цилиндрических сводов, опирающихся на второстепенные балки перекрытия.

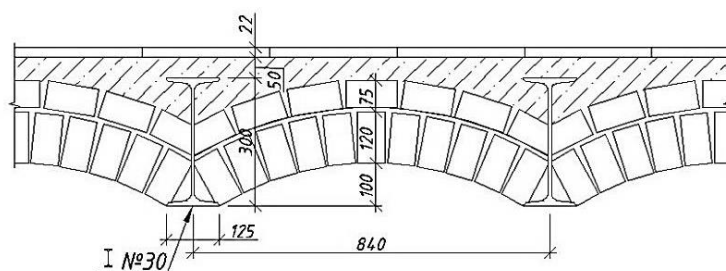


Рисунок 9. – Конструктивное решение междуэтажного перекрытия корпуса Б

В осях 2'-4' устроен фонарь, по конструктивному решению аналогичный фонарю в корпусе А, и является его продолжением.

Крыша с деревянной стропильной системой и холодным чердаком. Утеплитель чердачного перекрытия – котельный шлак, толщиной 150 мм. Кровля из волнистых асбоцементных листов. Полы, заполнение оконных проемов, двери и ворота – аналогично как в корпусе А.

При обследовании выполнялся осмотр элементов здания с фотофиксацией дефектов и повреждений, делались поверочные расчеты. По результатам технического обследования установлено следующее.

1. Техническое состояние обследуемых конструкций ПТКИ характеризуется [5; 6]:

– II-ей категорией (удовлетворительное состояние) – малозначительные дефекты устраняются в процессе установленного регламента технического обслуживания (фундаменты, внутренние стены, стальной каркас, междуэтажные сводчатые кирпичные перекрытия корпусов А и Б, чердачное сводчатое железобетонное перекрытие корпусов А и Б, сводчатое железобетонное покрытие фонаря корпуса А, междуэтажные и чердачные перекрытия пристроек корпуса А, покрытия пристройки корпуса Б). Исключение составляют соединительные балки в осях 2'-4'/Д-К корпуса Б, в уровне перекрытия 2-го этажа имеющие изгибы. Это можно объяснить отсутствием деформационных швов между корпусами здания ПТКИ. Необходимо восстановить вырезанные соединительные балки в указанных осях;

– III-ей категорией (не вполне удовлетворительное состояние) – имеющиеся дефекты оказывают некоторое влияние на их несущую способность, опасность разрушения отсутствует (наружные стены). Требуется их ремонт с очисткой поврежденных поверхностей и восстановлением штукатурного слоя с применением ремонтных полимерцементных составов;

– IV–V категориями – неработоспособное, предаварийное состояние. Возможно обрушение, эксплуатация опасной зоны запрещена, требуется капитальный ремонт с частичной заменой конструкций (покрытие пристройки корпуса А в осях 25-31);

– IV-ой категорией (неработоспособное состояние) – необходимо ограничение нагрузок, срочное усиление и замена поврежденных конструкций (деревянная стропильная система крыш корпусов А и Б);

– III–IV категориями на всех обследуемых участках здания характеризуется кровля, которая подлежит ремонту или замене. Исключение составляет кровельное покрытие из профнастила, которое после ремонта крыши может использоваться повторно.

2. Надежность, несущая способность и устойчивость фундаментов, стен и стального каркаса, перекрытий здания обеспечены.

3. Несущая способность деревянной стропильной системы крыши на неповрежденных участках обеспечена. Однако в результате длительной эксплуатации деревянные элементы стропильной системы получили многочисленные повреждения – требуется капитальный ремонт с заменой и усилением конструкций.

4. Несущая способность сборных железобетонных плит перекрытий и покрытий пристроек обеспечена.

Заключение. В результате проведенного технического обследования строительных конструкций здания, определения прочности и выполненных поверочных расчетов многослойных железобетонных плит перекрытий и ребристых железобетонных плит покрытий, монолитного сводчатого перекрытия; расчета каркаса здания, деревянной стропильной системы крыши; определения прочности материалов фундаментов и материалов для кладки стен; анализа полученных результатов о техническом состоянии конструкций, даны рекомендации, необходимые для дальнейшей реконструкции здания производства тканых ковровых изделий в г. Витебске. Обследование исторического здания промышленной архитектуры начала XX века позволило изучить его конструктивные особенности, а рекомендации по реконструкции продлят эксплуатацию и позволят узнать больше о таких объектах будущим архитекторам и строителям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородулин М., Петров Д., Рябушев Г. Ровесник века. – Минск: Беларусь, 1969. – С. 3–22.
2. Петров Д.И. Работаю по-коммунистически. – Минск: Государственное издательство БССР, 1961. – С. 3–6.
3. Федарук А.А., Цыбульскі М.Л. Віцебскія дываны // Беларуская энцыклапедыя: у 18 т. – Т. 4: Варанецкі-Гальфстрым (белар.) / рэдкал.: Г.П. Пашкоў і інш. – Мінск: БелЭн, 1997. – С. 233–234.
4. Пукшанский А. Новости от ОАО «Витебские ковры» // Витебский курьер. – 1995. – 5 мая. – С. 2.
5. Платонова Р.М., Зеленков А.Т. Оценка технического состояния строительных конструкций исторического здания в городе Витебске для дальнейшей реконструкции // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2020. – № 16. – С. 103–115.
6. Платонова Р.М., Зеленков А.Т. Реконструкция бывших казарм по ул. Буденного, 7 в городе Витебске под общественно-деловой центр по результатам технического обследования // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2021. – № 8. – С. 112–118.

REFERENCES

1. Borodulin, M., Petrov, D. & Ryabushev, G. (1969). Rovesnik veka (3–22). Minsk: Belarus'. (In Russ.).
2. Petrov, D.I. (1961). Rabotaem po-kommunisticheski (3–6). Minsk: Gosudarstvennoe izdatel'stvo BSSR. (In Russ.).

3. Fedaruk, A.A. & Tsybul'ski, M.L. (1997). Vitsebskiya dyvany. *Belaruskaya entsyklopedyya*: v 18 t. T. 4: Varanetski-Gal'fstryum (belar.) (233–234). In G.P. Pashkou (Ed.). Minsk: BelEn. (In Belarus.).
4. Pukshanskii, A. (1995). Novosti ot OAO «Vitebskie kovry». *Vitebskii kur'er*, (5 maya), 2. (In Russ.).
5. Platonova, R.M. & Zelenkov, A.T. (2020). Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya stroitel'nykh konstrukttsii istoricheskogo zdaniya v gorode Vitebske dlya dal'neishei rekonstruktsii [Evaluation of the technical condition of the building structures of the historical building in Vitebsk for further reconstruction]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki* [Vestnik of the Polotsk State University. Part F. Construction. Applied sciences], (16), 103–115. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Platonova, R.M. & Zelenkov, A.T. (2021). Rekonstruktsiya byvshikh kazarm po ul. Budennogo, 7 v gorode Vitebske pod obshchestvenno-delovoi tsentr po rezul'tatam tekhnicheskogo obsledovaniya [Reconstruction of the former barracks on the street. Budennogo, 7 in the city of Vitebsk under the public and business center according to the results of a technical inspection]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki* [Vestnik of the Polotsk State University. Part F. Construction. Applied sciences], (8), 112–118. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 23.09.2023

TECHNICAL CONDITION OF THE FORMER LINEN SPINNING FACTORY AT THE BEGINNING OF THE 20th CENTURY IN VITEBSK

R. PLATONOVA¹⁾, M. PLATONOVA²⁾, A. ZELENKOV³⁾

^(1), 2)Belarusian National Technical University, Minsk, ³⁾«SALYUS», Novopolotsk)

The analysis of space-planning and constructive solution of woven carpet products manufacturing building which was built at the beginning of the 20th century in Vitebsk was performed. On the basis of visual and instrumental examinations of building constructions, calibration calculations and obtained results the conclusions about technical condition of constructions were made. The recommendations for its further reconstruction and reliable operation are given. The reconstruction of the historical building of industrial architecture will help to preserve it for future generations.

Keywords: carpet plant, linen spinning factory, technical survey, building constructions, overlap, foundation, walls, recommendations, reconstruction.

УДК 691:035.267

DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-48-54

ОГРАЖДАЮЩИЕ СТЕНОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЛИТ ИЗ ЛЬНЯНЫХ ОЧЕСОВ

С.А. РОМАНОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье рассмотрены теплоизоляционные материалы волокнистой структуры на основе растительных сельскохозяйственных отходов. Представлены результаты натурных испытаний утеплителя из очесов льна, применяемого для теплоизоляции наружного стенового ограждения с вентилируемой системой утепления одноэтажного жилого дома. Приведены данные исследований теплофизических характеристик стеновой ограждающей конструкции с экспериментальными материалами. Построены графики распределения температур по толщине конструкции стенового ограждения, после чего рассчитаны значения термического сопротивления теплопередаче. Выявлены зависимости распределения влажности по толщине тепловой изоляции. По итогам натурных испытаний установлено, что при температуре наружного воздуха -23°C значение термического сопротивления теплопередаче стены с экспериментальным утеплителем из очесов равно $3,24 (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$. Результаты исследований доказывают эффективную работу теплоизоляционных материалов на основе льняных очесов для стеновых ограждающих конструкций.

Ключевые слова: тепловая изоляция, льняные очесы, волокна льна, жидкое стекло, термическое сопротивление теплопередаче, влажность.

Введение. При постоянном повышении цен на энергетические ресурсы и стратегии энергосбережения строительная отрасль Беларуси ориентируется на создание эффективной тепловой изоляции, позволяющей повысить термическое сопротивление утеплителя и минимизировать тепловые потери через ограждающие конструкции зданий и сооружений. Значительных достижений по обеспечению высоких теплотехнических показателей теплоизоляционных плит удалось достичь, применяя растительные отходы сельскохозяйственного производства. Стоит отметить, что использование растительного сырья позволяет также решать проблемы с утилизацией и рациональным применением сельскохозяйственных отходов.

Утеплитель, включающий конопляные волокна, полиэстер и соду, выпускают в Германии [1; 2]. Теплоизоляционный материал применяется для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и характеризуется коэффициентом теплопроводности $0,038\text{--}0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ при плотности от 35 до $40 \text{ кг}/\text{м}^3$.

В Литве и Чехии проведены исследования по модификации теплоизоляционных плит из конопляных и полиэфирных волокон [3]. Для снижения водопоглощения образцы тепловой изоляции обрабатывали гидрофобными составами. Испытания проводили на образцах утеплителя, обладающих в сухом состоянии средней плотностью $29\text{--}40 \text{ кг}/\text{м}^3$ и теплопроводностью $0,044\text{--}0,051 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$. Проведенный эксперимент подтвердил уменьшение показателя водопоглощения теплоизоляционного материала относительно необработанных составов.

Конопляные и полилактидные волокна применяли в качестве структурообразующего материала и связующего для теплоизоляционных плит в исследовательской работе [4]. Полученная тепловая изоляция обеспечивает коэффициент теплопроводности $0,037\text{--}0,039 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ и прочность на сжатие $0,25\text{--}0,51 \text{ кПа}$ при плотности от 40 до $90 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Теплоизоляционные материалы из волокон технической конопли, обработанные антипиреном, получены в Республике Казахстан. Коэффициент теплопроводности нетканого утеплителя, изготовленного иглопробивным способом, составляет $0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ [5].

Получению тепловой изоляции на основе отходов хлопка и жидкого стекла посвящены исследования в Полоцком университете. Разработанные утеплители при средней плотности от 40 до $100 \text{ кг}/\text{м}^3$ обладают коэффициентом теплопроводности в диапазоне $0,037\text{--}0,041 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ¹.

Отход хлопка в качестве структурообразующего материала также применяли для изготовления теплоизоляционных плит в работе [6]. Тепловая изоляция обеспечивает коэффициент теплопроводности $0,059 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ при плотности $150 \text{ кг}/\text{м}^3$.

В Эфиопском университете изучали возможность применения отходов трикотажного производства и поливинилацетатного клея для теплоизоляционного материала [7]. Утеплитель имеет среднюю плотность $144 \text{ кг}/\text{м}^3$ и обладает коэффициентом теплопроводности $0,123 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Теплоизоляционные плиты на основе волокон коры масличной пальмы разработаны в Малайзии². Проведенные исследования подтвердили эффективность использования волокон коры для тепловой изоляции. Полученные утеплители при плотности $66\text{--}110 \text{ кг}/\text{м}^3$ обеспечивают коэффициент теплопроводности $0,03\text{--}0,09 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

¹ Rozyev M., Bakatovich A. Thermal insulation material, using waste cotton production as a placeholder // XI Junior Researchers, Conference. European & national dimension in research. Architecture and civil engineering. – 2019. – № 11. – P. 64–66.

² Hassan S.A., Tesfamichael A., Mohd M.N. Comparison study of thermal insulation characteristics from oil palm fibre // MATEC Web of Conferences. ICPER 2014: 4th International Conference on Production, Energy and Reliability. – 2014. – Vol. 13. DOI: 10.1051/mateconf/20141302016.

Также малазийскими учеными исследованы свойства теплоизоляционных плит из смеси волокон целлюлозы и масличной пальмы [8]. В виде связующего использовали формальдегидную смолу. Анализ результатов исследований показал, что при средней плотности 250 кг/м^3 (соотношение масличных и целлюлозных волокон 1:1) коэффициент теплопроводности утеплителя равен $0,045 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$.

В Тринидаде в виде сырья для тепловой изоляции применяли кокосовые волокна. Теплоизоляционный материал обеспечивает коэффициент теплопроводности $0,058\text{--}0,097 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ при варьировании плотности от 30 до 115 кг/м^3 [9; 10].

Исследования коэффициента теплопроводности утеплителей на основе кокосовых волокон проводили в Ан-доласском университете. По результатам эксперимента выявлено, что наименьшее значение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных плит составляет $0,104 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ [11].

Тепловая изоляция из волокон кокоса [12], джута [13] и жидкого стекла разработана в Беларуси. При средней плотности $70\text{--}145 \text{ кг/м}^3$ коэффициент теплопроводности утеплителя на основе волокон кокоса равен $0,039\text{--}0,056 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$. Теплоизоляционные плиты из джутовых волокон характеризуются коэффициентом теплопроводности $0,037\text{--}0,049 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ при плотности от 60 до 100 кг/м^3 .

Эксперимент по получению теплоизоляционного материала из волокон джута и шерсти проведен в Италии [14]. В качестве волокнистого структурообразующего материала использовали только вторичное сырье. Утеплитель при средней плотности 20 кг/м^3 обеспечивает значение теплопроводности $0,04 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$.

Банановые волокна в качестве структурообразующего материала использовались для изготовления тепловой изоляции в научной работе [15]. Образцы теплоизоляционных материалов при варьировании плотности от 20 до 120 кг/м^3 обладают коэффициентом теплопроводности $0,041\text{--}0,067 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$.

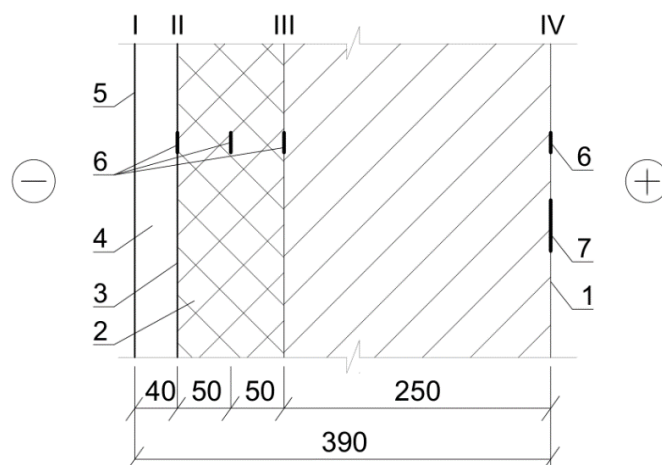
В Полоцком университете проводятся исследования по получению утеплителей из очесов льна³. В виде вяжущего применяется натриевое жидкое стекло, модифицированное комплексной добавкой извести и гипса. Использование льняных очесов для тепловой изоляции решает проблему утилизации растительных отходов льнопереработки, расширяет номенклатуру эффективных волокнистых утеплителей и обеспечивает получение полностью экологически безопасного материала. Проведенные эксперименты подтверждают возможность применения теплоизоляционных материалов в качестве утеплителя для зданий и сооружений. При этом следует отметить, что опыт экспериментальных исследований указывает на необходимость проведения натурных испытаний материалов в ограждающих конструкциях эксплуатируемых зданий для подтверждения эффективной работы теплоизоляционных плит, особенно на растительной основе.

Методика испытаний. Натурные испытания теплоизоляционных материалов из очесов льна проводили в осенне-весенние периоды 2018–2023 годов. Для сравнения исследовали утеплитель из волокон льна и модифицированного вяжущего, а также теплоизоляционные плиты на основе смеси льняных и полиэфирных волокон. Экспериментальная тепловая изоляция применялась в качестве теплоизоляционного слоя в конструкции стенового ограждения из керамического кирпича с вентилируемой системой утепления эксплуатируемого одноэтажного жилого дома. Проведение натурных испытаний выполняли на образцах в виде теплоизоляционных плит с габаритными размерами $1000 \times 500 \times 100 \text{ мм}$. Утеплитель из очесов (состав 1) или волокон (состав 2) льна изготавливали средней плотностью 100 кг/м^3 при следующем расходе компонентов: волокнистый структурообразующий материал – $90 \text{ кг на } 1 \text{ м}^3$, жидкое стекло – $9 \text{ кг на } 1 \text{ м}^3$, комплексная добавка извести и гипса при соотношении компонентов 1:1 – $1 \text{ кг на } 1 \text{ м}^3$. Образец тепловой изоляции на основе смеси льняных и полиэфирных волокон (состав 3) вырезали из теплоизоляционного материала торговой марки «Акотерм флакс» плотностью 34 кг/м^3 , т.к. применяемая технология формовки и структурообразования данных теплоизоляционных плит не позволяет получать утеплитель более высокой плотности. Коэффициенты теплопроводности в сухом состоянии теплоизоляционных материалов на основе очесов льна и плит «Акотерм флакс» составляет $0,04 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, тепловой изоляции из льняных волокон – $0,045 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$.

Конструкция стены включала в себя кладку из керамического полнотелого кирпича, тепловую изоляцию на основе утеплителя из очесов льна (стена 1), из льняных волокон (стена 2), а также из смеси льняных и полиэфирных волокон (стена 3), гидроветрозащитную мембрану, воздушную прослойку толщиной 40 мм и фасадные металлические кассеты. На рисунке 1 представлена схема установки датчика теплового потока и термопар для определения теплотехнических показателей ограждающей конструкции. Для более подробного исследования изменения температуры в толще теплоизоляционного материала, условно разделяли утеплитель на 2 слоя толщиной по 50 мм и устанавливали термопары.

После проведения натурных испытаний исследовали распределение влажности по толщине экспериментальных утеплителей. С данной целью по толще теплоизоляционных плит вырезали образцы-призмы размерами $50 \times 50 \times 100 \text{ мм}$. Далее образцы-призмы разделяли на 4 образца-фрагмента толщиной по 25 мм. Полученные образцы взвешивали, затем помещали в сушильный шкаф для высушивания до постоянной массы, после чего снова взвешивали и на основании выявленных значений вычисляли влажность образцов-фрагментов теплоизоляционных плит.

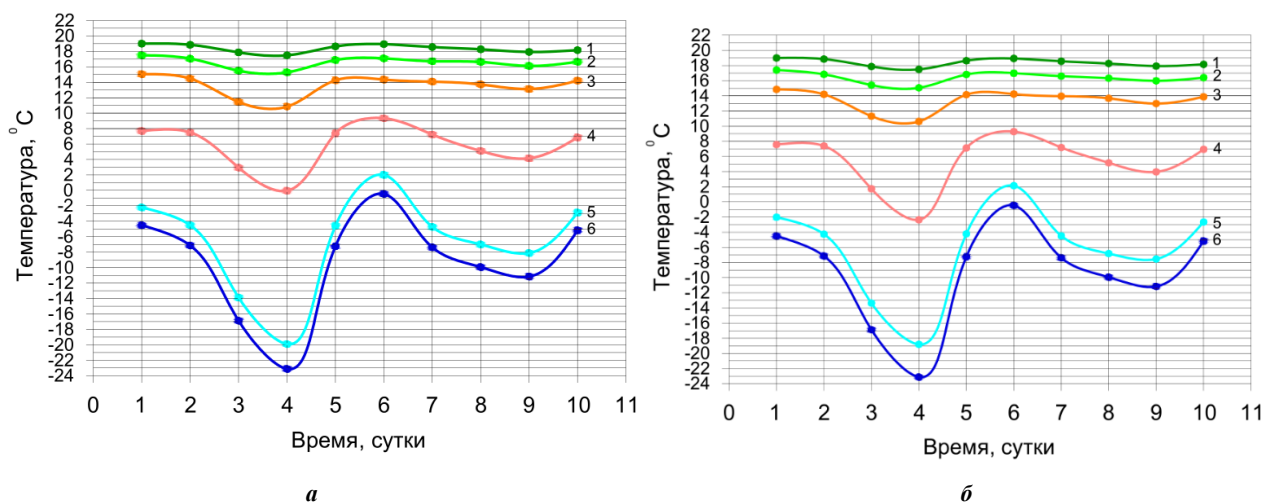
³ Romanovskiy S.A. Physical parameters of insulation with a structure-forming material from flax noils / ICBTE 2020: E3S Web of Conferences, 212, art. no. 02014. DOI: 10.1051/e3sconf /2020212020_14.



I, II, III, IV – границы слоев конструкции стенового ограждения;
1 – кладка из кирпича керамического; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – мембрана гидроветрозащитная;
4 – воздушная прослойка; 5 – фасадная металлическая кассета; 6 – термопары; 7 – датчик теплового потока

Рисунок 1. – Схема расположения термопар и датчиков тепловых потоков по сечению конструкции стенового ограждения из керамического кирпича с вентиляруемой системой утепления

Результаты и обсуждения. В качестве примера рассмотрен промежуток времени с 20 февраля по 1 марта 2023 года, характеризующийся наиболее низкими температурами наружного воздуха в ночной период в Полоцком районе. На рисунке 2 приведены графики распределения температур по толщине ограждающей конструкции с утеплителями из очесов и волокон льна. График распределения температур для наружного ограждения с тепловой изоляцией на основе льняных и полиэфирных волокон не добавляли, так как показатели температур по толще конструкции стен, содержащих льняные очесы, и плиты «Акотерм флакс» имеют относительно близкие значения. При построении графиков использовали значения, соответствующие средним показателям температур за временной промежуток, равный 10 часам, с девяти часов вечера до семи часов утра.



а – наружная стена 1; б – наружная стена 2;
1 – температура внутри помещения, °C; 2 – температура кирпичной кладки внутри помещения, °C;
3 – температура поверхности утеплителя на границе III, °C; 4 – температура в середине тепловой изоляции, °C;
5 – температура поверхности утеплителя на границе II, °C; 6 – температура наружного воздуха, °C

Рисунок 2. – Распределение температуры по толщине конструкции стенового ограждения из керамического кирпича с вентиляруемой системой утепления

Из полученных результатов (см. рисунок 2) следует, что наиболее холодные ночные часы зафиксированы на четвертые сутки. Разница температур на поверхностях конструкции стенового ограждения 1 в ночные часы четвертых суток равна 31,5 °C, что больше показателя стены с теплоизоляционными плитами из волокон льна на 1,7 °C и практически совпадает со значением наружного стенового ограждения, содержащего тепловую изоляцию «Акотерм флакс».

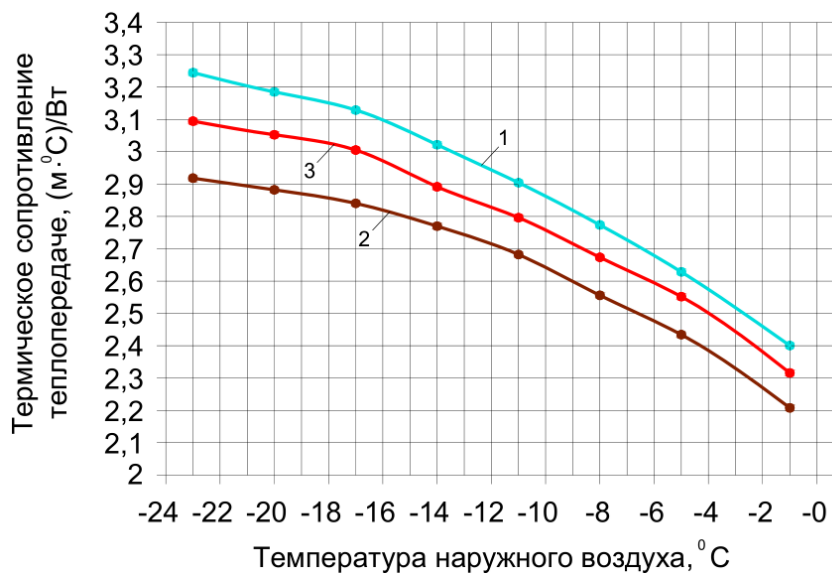
По данным графиков (см. рисунок 2) определены средние значения распределения температур в помещении, конструкции стен и наружного воздуха в период времени с 20 февраля по 1 марта. В таблице 1 представлены рассчитанные значения средних показателей температур.

Таблица 1. – Средние значения температур в помещении, конструкции стен и наружного воздуха

Показатель	Стена 1	Стена 2	Стена 3
Температура наружного воздуха, °С	-9,3	-9,3	-9,3
Температура поверхности тепловой изоляции на границе II, °С	-6,5	-5,7	-6,4
Температура в середине теплоизоляционной плиты, °С	5,6	5,1	5,4
Температура поверхности утеплителя на границе III, °С	13,9	13,2	13,7
Температура поверхности кладки из керамического кирпича на границе IV, °С	16,8	16,0	16,7
Температура воздуха в помещении, °С	18,2	18,2	18,2

Из приведенных результатов исследования (см. таблицу 1) установлено, что на поверхности тепловой изоляции стеновой конструкции 1 на границе II средний показатель температуры за 10 суток составляет -6,5 °С, что на 0,8 °С ниже значения стенового ограждения 2 и практически не отличается от величины наружного ограждения 3. Средний показатель температуры теплоизоляционной плиты из очесов (стена 1) за тот же период времени на 0,5 °С выше величины утеплителя на основе волокон льна (стена 2) и имеет близкое значение с показателем тепловой изоляции «Акотерм флакс» (стена 3). Сравнивая температуры поверхности утеплителя на границе III за промежуток времени 10 суток установлено, что средняя величина стенового ограждения, содержащего теплоизоляционный материал из очесов, характеризуется относительно близким показателем с конструкцией стены 3 и на 0,7 °С выше значения наружного ограждения с теплоизоляционной плитой на основе льняных волокон. За аналогичный период времени средний показатель температуры поверхности кирпичной кладки на границе IV стенового ограждения с тепловой изоляцией из очесов льна на 0,8 °С выше значения стены 2 и практически совпадает с величиной конструкции наружного ограждения, содержащего плиты на основе льняных и полиэфирных волокон.

На рисунке 3 представлены значения термического сопротивления теплопередаче наружного стенового ограждения в зависимости от температуры наружного воздуха, определенные на основании зафиксированных значений плотностей тепловых потоков.



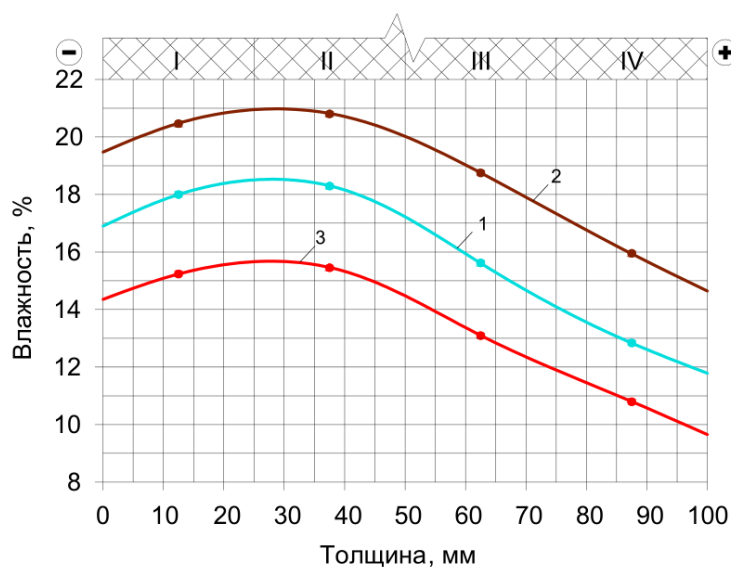
конструкция стены, содержащая тепловую изоляцию: 1 – из очесов;
2 – из льняных волокон; 3 – «Акотерм флакс»

Рисунок 3. – Сопротивления теплопередаче конструкции наружной стены в зависимости от температуры наружного воздуха

Анализ данных, представленных на рисунке 3, позволил установить, что показатель термического сопротивления теплопередаче конструкций стенового ограждения, содержащих исследуемые теплоизоляционные материалы, изменяется от 2,21 до 2,4 (м²·°С)/Вт при температуре наружного воздуха -1 °С. Значение термического сопротивления стены с утеплителем на основе очесов льна при температуре воздуха -23 °С составляет 3,24 (м²·°С)/Вт, что на 11% больше показателя наружного ограждения с тепловой изоляцией из льняных волокон, равного 2,92 (м²·°С)/Вт, и практически не отличается от показателя стены 3. Повышение термического сопротивления теплопередаче

наружного ограждения, включающего утеплитель на основе очесов льна, на 34% с 2,4 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$)/Вт до 3,24 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$)/Вт при изменении температуры наружного воздуха с -1°С до -23°С свидетельствует об эффективной работе теплоизоляционных плит из очесов льна в конструкции стенового ограждения эксплуатируемого одноэтажного дома.

После окончания мониторинга теплофизических показателей в стеновой ограждающей конструкции жилого дома исследованы показатели влажности экспериментальных теплоизоляционных плит (рисунок 4). Основываясь на полученных сведениях, рассчитаны средние значения влажности исследуемых теплоизоляционных плит. Средний показатель влажности для тепловой изоляции на основе очесов льна составляет 16,1%, что на 15% ниже величины утеплителя из льняных волокон и на 18% выше показателя теплоизоляционного материала «Акотерм флакс». Прирост значения влажности в образце-фрагменте I теплоизоляционной плиты из волокон льна по сравнению с утеплителем на основе очесов льна равен 18%, а относительно тепловой изоляции из смеси льняных и полиэфирных волокон – 35%. Наибольшее количество влаги зафиксировано в образцах-фрагментах II. Установлено, что в указанном образце-фрагменте влажность теплоизоляционного материала (состав 1) повышается до 18% относительно образца-фрагмента I, что, в свою очередь, на 17% выше значения тепловой изоляции «Акотерм флакс» и на 13% ниже показателя теплоизоляционной плиты на основе волокон льна. Теплоизоляционные материалы (составы 1, 2 и 3) в образце-фрагменте IV достигают влажности, равной 12,8%, 15,9% и 10,8% соответственно. При этом влажность утеплителя из очесов льна меньше величины тепловой изоляции, содержащей волокна льна, на 15% и больше показателя влажности плиты на основе льняных и полиэфирных волокон на 19%.



I–IV – образцы-фрагменты в тепловой изоляции;
1 – образцы на основе очесов; 2 – образцы на основе льняных волокон;
3 – образцы на основе смеси льняных и полиэфирных волокон

Рисунок 4. – Распределение влажности по толщине утеплителей

Меньшее значение влажности в утеплителе на основе льняных и полиэфирных волокон относительно показателя тепловой изоляции из очесов или волокон льна обусловлено присутствием в составе теплоизоляционной плиты «Акотерм флакс» связующего в виде полиэфирных волокон, способствующих снижению поглощенной материалом влаги из воздуха по сравнению с льняными очесами и волокнами.

Помимо конструкции стенового ограждения из керамического кирпича с вентилируемой системой утепления натурные испытания плит на основе очесов льна также проведены для стеновой ограждающей конструкции жилого дома с деревянной каркасной системой и на чердачном перекрытии по деревянным балкам одноэтажного эксплуатируемого жилого дома. Проведенные исследования позволили установить, что конструкция стены с деревянной каркасной системой, содержащая в качестве теплоизоляции утеплитель на основе очесов, при температуре наружного воздуха -19°С обеспечивает термическое сопротивление 4,55 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$)/Вт. Конструкция чердачного перекрытия с теплоизоляционными плитами из льняных очесов при температуре воздуха в объеме чердачного пространства -17°С обладает термическим сопротивлением теплопередаче, равным 6,27 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$)/Вт. Определенные значения теплотехнических свойств приведенных ограждающих конструкций доказывают эффективность использования теплоизоляционного материала на основе очесов льна как утеплителя.

Заключение. Результаты натурных испытаний теплоизоляционных плит из льняных очесов в качестве теплоизоляционного слоя в конструкции стенового ограждения из керамического кирпича с вентилируемой системой утепления подтверждают эффективную работу теплоизоляционного материала.

По итогам проведенных испытаний установлено, что при эксплуатации конструкции стенового ограждения с тепловой изоляцией на основе очесов льна термическое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции при температуре наружного воздуха -1°C составляет $2,4 (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$. При снижении температуры до -23°C показатель термического сопротивления повышается на 34% до значения, равного $3,24 (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$. Величина термического сопротивления конструкции стены с утеплителем из льняных очесов при температуре наружного воздуха -23°C на 11% выше значения стенового ограждения с утеплителем на основе волокон льна. Стеновая ограждающая конструкция с теплоизоляционной плитой «Акотерм флакс» имеет достаточно близкое значение с показателем термического сопротивления стены, содержащей тепловую изоляцию из льняных очесов.

Среднее значение влажности теплоизоляционной плиты на основе очесов льна после проведения натурных испытаний составляет 16,1%, что на 15% ниже показателя влажности теплоизоляционной плиты из волокон льна и на 18% выше величины тепловой изоляции на основе льняных и полиэфирных волокон.

Экспериментальные утеплители из льняных очесов находятся в стеновом ограждении в течение года. В указанный период проводился постоянный мониторинг состояния теплоизоляционных плит, подтвердивший отсутствие повреждений и деформаций во время эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатова Т.В., Двойницына А.И. Преимущества и особенности безопасных природных утеплителей // Инженер. сети и сооружения. – 2016. – № 3–4 (24–25). – С. 14–19.
2. Якунина Е.А. Современные теплоизоляционные материалы как одна из тенденций экологического строительства // Синергия наук. – 2018. – № 24. – С. 625–634.
3. Development of Thermal Insulating Materials on Natural Base for Thermal Insulation Systems / J. Zach, J. Hroudová, J. Brožovský et al. // *Procedia Engineering*. – 2013. – № 57. – P. 1288–1294. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.162.
4. Development and investigation of thermal insulation from hemp-poly lactide fibres / R. Stapulionienė, R. Tupčiauskas, S. Vaitkus et al. // *Engineering structures and technologies*. – 2016. – № 8(1). – P. 23–30. DOI: 10.3846/2029882X.2016.1158127.
5. Мезенцев И.С., Красина И.В., Парсанов А.С. Разработка строительного утеплителя на основе волокон технической конопли // Технологии и качество. – 2022. – № 2(56). – С. 40–45. DOI: 10.34216/2587-6147-2022-2-56-40-45.
6. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers / X. Zhou, F. Zheng, H. Li et al. // *Energy and Buildings*. – 2010. – № 42. – P. 1070–1074. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.01.020.
7. Thermal and sound insulation properties of recycled cotton/polyester chemical bonded nonwovens / S. Sakthivel, S. Kumar, S. Mekonnen et al. // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. – 2020. – Vol. 15. DOI: 10.1177/1558925020968819.
8. Thermal Performance of Oil Palm Fibre and Paper Pulp as the Insulation Materials / S.H. Ibrahim, W.K. Sia, A. Baharun et al. // *UNIMAS e-Journal of Civil Engineering*. – 2014. – P. 22–28.
9. Kochhar G.S., Manohar K. Use of coconut fiber as a low-cost thermal insulator // *Simposia paper*. – 1997. – 01 January. – P. 283–291. DOI: 10.1520/STP12281S.
10. Manohar K., Yarbrough D.W., Kochhar G.S. Building Thermal Insulation – Biodegradable Sugarcane and Coconut Fiber // *Journal of Building Physics*. – 2000. – № 23(3). – P. 263–276. DOI: 10.1177/174425910002300308.
11. Kimura R., Ohsumi M., Susanti L. Development of Thermal Insulation Material Using Coconut Fiber to Reuse Agricultural Industrial Waste // *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. – 2018. – № 8(3). – P. 805–810. DOI: 10.18517/ijaseit.8.3.4610.
12. Конохов М.В., Послед Е.В. Теплоизоляционные плиты на основе кокосовых волокон // Электрон. сб. тр. молодых специалистов Полоц. гос. ун-та им. Евфросинии Полоцкой. Приклад. науки. Стр.-во. – 2022. – Вып. 44(114). – С. 71–72.
13. Конохов М.В., Послед Е.В. Утеплитель из джутовых волокон // Электрон. сб. тр. молодых специалистов Полоц. гос. ун-та им. Евфросинии Полоцкой. Приклад. науки. Стр.-во. – 2022. – Вып. 44(114). – С. 69–70.
14. Thermo-acoustic building insulation materials fabricated with recycled fibers – Jute, Wool and Loofah // A. Majumder, M. Achenza, C. Mastino et al. // *Energy & Buildings*. – 2023. – Vol. 293. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113211.
15. Manohar K., Adeyanju A. A Comparison of Banana Fiber Thermal Insulation with Conventional Building Thermal Insulation // *British Journal of Applied Science & Technology*. – 2016. – № 17(3). – P. 1–9. DOI: 10.9734/BJAST/2016/29070.

REFERENCES

1. Bogatova, T.V. & Dvoynitsyna, A.I. (2016). Preimushchestva i osobennosti bezopasnykh prirodnnykh uteplitelei [Advantages and features of harmless natural insulation]. *Inzhenernye seti i sooruzheniya [Engineering networks and coarmaments]*, 3–4(24–25), 14–19. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Yakunina, E.A. (2018). Sovremennyye teploizolyatsionnyye materialy kak odna iz tendentsii ekologicheskogo stroitel'stva [Modern heat-insulating materials as one of the trends in ecological construction]. *Sinergiya nauk [Synergy Science]*, (24), 625–634. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Zach, J., Hroudová, J., Brožovský, J., Krejza, Z. & Gailius, A. (2013). Development of Thermal Insulating Materials on Natural Base for Thermal Insulation Systems. *Procedia Engineering*, (57), 1288–1294. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.162.
4. Stapulionienė, R., Tupčiauskas, R., Vaitkus, S. & Vejelis, S. (2016). Development and investigation of thermal insulation from hemp-poly lactide fibres. *Engineering structures and technologies*, 8(1), 23–30. DOI: 10.3846/2029882X.2016.1158127.
5. Mezentsev, I.S., Krasina, I.V. & Parsanov, A.S. (2022). Razrabotka stroitel'nogo uteplitelya na osnove volokon tekhnicheskoi konopli [Development of construction insulation based on technical hemp fibers]. *Tekhnologii i kachestvo [Technologies and quality]*, 2(56), 40–45. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.34216/2587-6147-2022-2-56-40-45.
6. Zhou, X., Zheng, F., Li, H. & Lu, C. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, (42), 1070–1074. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.01.020.

7. Sakthivel, S., Kumar, S., Mekonnen, S. & Solomon, E. (2020). Thermal and sound insulation properties of recycled cotton/polyester chemical bonded nonwovens. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, (15). DOI: 10.1177/1558925020968819.
8. Ibrahim, S.H., Sia, W.K., Baharun, A., Nawi, M.N.M. & Affandi, R. (2014). Thermal Performance of Oil Palm Fibre and Paper Pulp as the Insulation Materials. *UNIMAS e-Journal of Civil Engineering*, 22–28.
9. Kochhar, G.S. & Manohar, K. (1997). Use of coconut fiber as a low-cost thermal insulator. *Simposia paper*, (01 January), 283–291. DOI: 10.1520/STP12281S.
10. Manohar, K., Yarbrough, D.W. & Kochhar, G.S. (2000). Building Thermal Insulation – Biodegradable Sugarcane and Coconut Fiber. *Journal of Building Physics*, 23(3), 263–276. DOI: 10.1177/174425910002300308.
11. Kimura, R., Ohsumi, M. & Susanti, L. (2018). Development of Thermal Insulation Material Using Coconut Fiber to Reuse Agricultural Industrial Waste. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, 8(3), 805–810. DOI: 10.18517/ijaseit.8.3.4610.
12. Konyukhov, M.V. & Posled, E.V. (2022). Teploizolyatsionnye plity na osnove kokosovykh volokon. *Elektronnyi sbornik trudov molodykh spetsialistov Polotskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Evfrosinii Polotskoi. Prikladnye nauki. Stroitel'stvo*, 44(114), 71–72. (In Russ.).
13. Konyukhov, M.V. & Posled, E.V. (2022). Uteplitel iz dzhutovykh volokon. *Elektronnyi sbornik trudov molodykh spetsialistov Polotskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Evfrosinii Polotskoi. Prikladnye nauki. Stroitel'stvo*, 44(114), 69–70. (In Russ.).
14. Majumder, A., Achenza, M., Mastino, C., Baccoli, R. & Frattolillo, A. (2023). Thermo-acoustic building insulation materials fabricated with recycled fibers – Jute, Wool and Loofah. *Energy & Buildings*, (293). DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113211.
15. Manohar, K. & Adeyanju, A. (2016). A Comparison of Banana Fiber Thermal Insulation with Conventional Building Thermal Insulation. *British Journal of Applied Science & Technology*, 17(3), 1–9. DOI: 10.9734/BJAST/2016/29070.

Поступила 08.12.2023

ENCLOSING WALL STRUCTURES OF OPERATED RESIDENTIAL BUILDINGS USING THERMAL INSULATION PLATES FROM LINEN NOILS

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

The article discusses thermal insulation materials of a fibrous structure based on plant agricultural waste. The results of full-scale tests of flax noils insulation used for thermal insulation of an external wall fence with a ventilated insulation system of a one-story residential building are presented. Data from studies of the thermophysical characteristics of a wall enclosing structure with experimental materials are presented. Temperature distribution graphs along the thickness of the wall enclosure structure were constructed, after which the values of thermal resistance to heat transfer were calculated. The dependences of the distribution of humidity along the thickness of thermal insulation were revealed. Based on the results of full-scale tests, it was revealed that at an outside air temperature of -23°C , the value of thermal resistance to heat transfer of a wall with experimental insulation of flax noils is equal to $3,24 (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{W}$. The research results prove the effective operation of thermal insulation materials based on flax noils for wall enclosing structures.

Keywords: thermal insulation, flax noils, flax fibers, liquid glass, thermal resistance to heat transfer, humidity.

УДК 347.787+904(476.)

DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-55-68

ИТОГИ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТЕН И ПОДПОЛЬЯ ПЕРВОГО ЭТАЖА ДОМА ПО ПРОСПЕКТУ Ф. СКОРИНЫ, 5

А.А. СОЛОВЬЁВ*(Национальный Полоцкий историко-культурный музей-заповедник)*

В статье представлены итоги натурного изучения первого этажа восточной части бывшего гостиничного комплекса «Гранд Отель» на углу ул. Ленина и проспекта Ф. Скорины. Расчистка подполий, пазух сводов над подвалами и зондажные работы на стенах позволили выявить ряд разновременных конструкций и археологических артефактов, связанных с архитектурной историей изучаемого здания и располагавшихся в нём различных учреждений. В частности, особый интерес представляют артефакты, связанные с функционированием данного здания как составного корпуса «Гранд Отеля», располагавшегося здесь до 1917 г. и возрождаемого сегодня новым собственником.

Ключевые слова: «Гранд Отель», натурные исследования, городская архитектура, шурфы, зондажи, кафель, изразцы, реконструкция.

Введение. Изучаемое здание располагается по адресу: проспект Ф. Скорины, 5, г. Полоцк. Объект является историко-культурной ценностью 3-й категории. Длительное время здесь находились учебные помещения Профессионально-технического училища № 2 (с мая 2004 г. – Полоцкого государственного профессионально-технического колледжа, с июля 2014 г. – Полоцкого государственного химико-технологического колледжа). В 2019 г. объект был приобретен частной компанией ООО «Форт кей» с целью устройства в нём гостиничного комплекса под названием «Гранд Отель». Весной этого же года в здании начались ремонтно-строительные работы. Необходимость сбора дополнительных сведений по реконструируемому историческому объекту, имеющему статус историко-культурной ценности, стала целью детального натурального изучения памятника. В том же 2019 г. были приобретены остальные примыкающие к зданию постройки, среди них дом № 3 по проспекту Ф. Скорины и объекты со стороны дворовой территории.

Здания, обращённые фасадами на проспект, получили названия «Отель» (дом № 5) и «Сталинка» (дом № 3). Корпус, расположенный в глубине квартала, получил название «Перемычки», поскольку соединял упомянутые выше здания со стоявшим строением на северной стороне квартала. Здание (его мы называли «Крепость»), обращённое главным фасадом на ул. Советская (ранее – ул. Спасская), не имело каких-либо архитектурных украшений, но отличалось значительной толщиной стен и небольшими размерами окон. О древности постройки также свидетельствовало низкое расположение окон нижнего этажа, что указывало на значительное нарастание культурного слоя со стороны улицы. На проспект Ф. Скорины выходят фасады двух зданий изучаемого гостиничного комплекса: западное (дом № 3) и восточное (дом № 5). Данная работа посвящена натурным исследованиям подвалов, фундаментов и стен первого этажа «Отеля», расположенного на углу проспекта Ф. Скорины и ул. Ленина (дом № 5) (рисунок 1).

Изучаемая нами часть комплекса в начале XX в. располагалась на углу улиц Витебской и Вознесенской, имела два лицевых фасада – южный и восточный с элементами архитектуры классицизма и эклектики. Северный фасад (со стороны двора) сегодня практически лишён украшений, а несогласованное расположение окон его этажей свидетельствует о наличии перестроек. Дата возведения здания «Отеля» неизвестна, однако по своим конструктивным и архитектурно-стилистическим особенностям его можно отнести к XIX – началу XX вв.

На планах Полоцка конца XVIII в. на месте исследуемого здания и прилегающей к нему территории зафиксирован ряд небольших кирпичных(?) строений, фрагменты которых могли быть включены в структуру изучаемого нами объекта при возведении. Согласно данным «Маршрутов кварталов и дворовых участков по городу Полоцку. 1858–1859 гг.» (далее – «Маршруты»)¹, на его месте был пустырь без признаков каких-либо сооружений, но к началу 1870-х гг. строение уже было возведено. Явные следы переделок имеются только в северо-западном углу здания. Под центральной частью дома устроен сводчатый подвал, который образует его поперечную ось.

Основная часть. Изучаемый памятник пережил ряд серьезных перестроек, связанных с его восстановлением после войн и пожаров. Наиболее ранним из известных нам источников является проект от 15 мая 1874 г. по восстановлению здания после масштабного пожара 1871 г., в результате которого пострадала большая часть центральных кварталов города. Данный документ включал в себя планы обоих этажей и поперечный разрез здания с обозначением ряда перестроек (найден архитектором-реставратором В.В. Глинником в фондах Национального исторического архива Беларуси). Наличие проекта 1874 г. позволяет определить хронологический диапазон возведения здания между 1860 г. и началом 1870-х гг., находящий подтверждение в результатах натурных наблюдений. Последние показали, что основной массив здания сложен из малоформатного тонкого

¹ Маршруты кварталов и дворовых участков по городу Полоцку. 1858 – 1859 гг. – Национальный исторический архив Республики Беларусь. – Ф. 2523. Оп. 1. Ед. хр. 1.

кирпича размерами 4,5–5 × 12,5–13,0 × 24,5–25,0 см на известковом растворе. Обращает на себя внимание визуальное сходство формата кирпича, характера кладочного раствора, способа кладок и конструкций на уровне подвала с аналогичными материалами и конструкциями ряда зданий Полоцка. Среди них – дом № 35 по ул. Нижне-Покровской, отмеченный в «Маршрутах» в качестве каменного амбара, позднее перестроенного в жилое здание. Ещё один дом, сложенный из мелкого кирпича, по данным краеведа И.П. Дэйниса, до 70-х гг. XX в. располагался на углу улиц Нижне-Покровской и Свердлова. Кроме конструкций зданий, малоформатный кирпич также зафиксирован в кладках печей середины XIX в. при раскопках остатков постройки возле дома № 35 по ул. Нижне-Покровской археологом Н.И. Зданович² [1, с. 105–106].

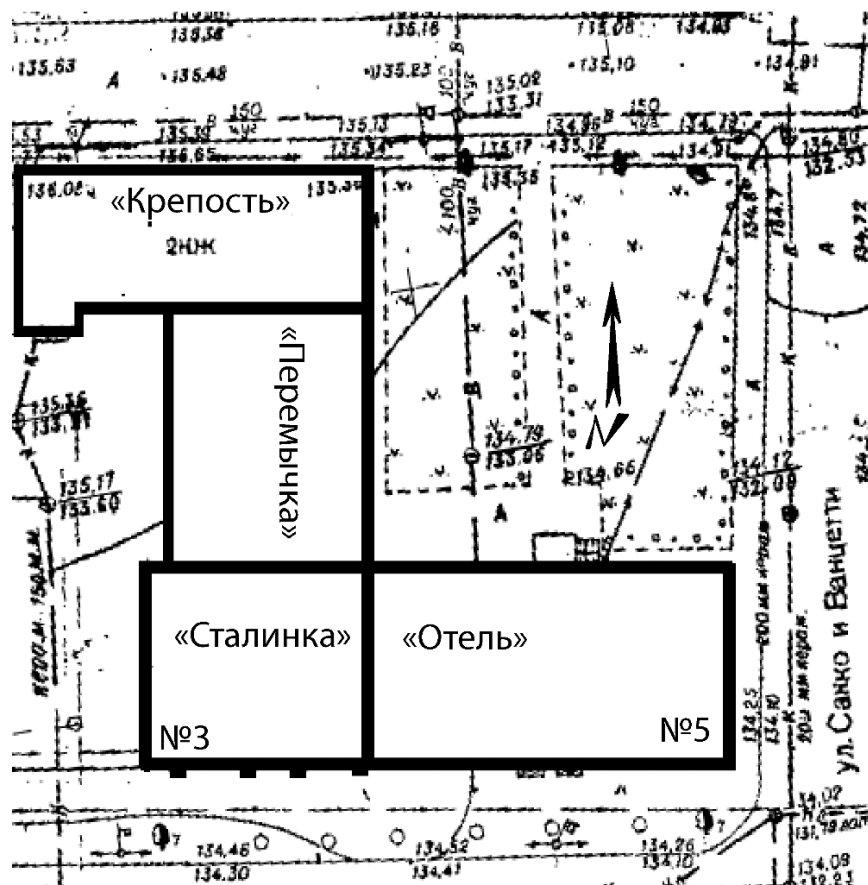


Рисунок 1. – Комплекс зданий бывшего «Гранд Отеля» с маркировкой строений

По данным путеводителя 1910 г., изданного к торжеству перенесения мощей преподобной Евфросинии Полоцкой, и сведениям И.П. Дейниса на первом этаже «Отеля» находилось Полоцкое общество взаимного кредита под руководством Баркана. Верхний этаж занимали жилые апартаменты. «Гранд Отель», владельцем которого был купец Бакаев (Бакиев), стояло на месте «Сталинки» [1, с. 105–106; 2]³. Очередной разрушительный пожар 1912 г. привел к новой масштабной реконструкции, что подтверждают данные натурных исследований [1, с. 297].

После революции 1917 г. в «Отеле» располагались различные учреждения и ведомства, результатом многочисленных перепланировок помещений с целью их приспособления для нужд новых хозяев стала полная утрата практически всех первоначальных элементов интерьеров и функционально-планировочной структуры.

В «Гранд Отеле» (на месте «Сталинки») размещались Революционный комитет (Ревком) и Районный исполнительный комитет. В изучаемом здании «Отеля» (дом № 5) в годы Первой мировой войны в период оккупации Полоцка кайзеровскими войсками (1918 г.) располагались клуб немецких офицеров и казино. Оно пострадало из-за артобстрелов во время Советско-польской войны 1919–1920 гг.; позднее, по её окончании, здание было восстановлено. В период НЭПа (1921–1930-е гг.) на первом этаже здания, как и ранее, действовало

² Зданович Н.И. Да пытання рэканструкцыі старажытнай забудовы Полацка // Гісторыя і археалогія Полацка і Полацкай зямлі: матэрыялы IV Міжнарод. навук. канф., 23-24 кастр. 2002 г., Полацк / Пад рэд. Т.А. Джумантаевай. – Полацк: НПГКМЗ, 2003. – С. 131–137 (см. с. 134).

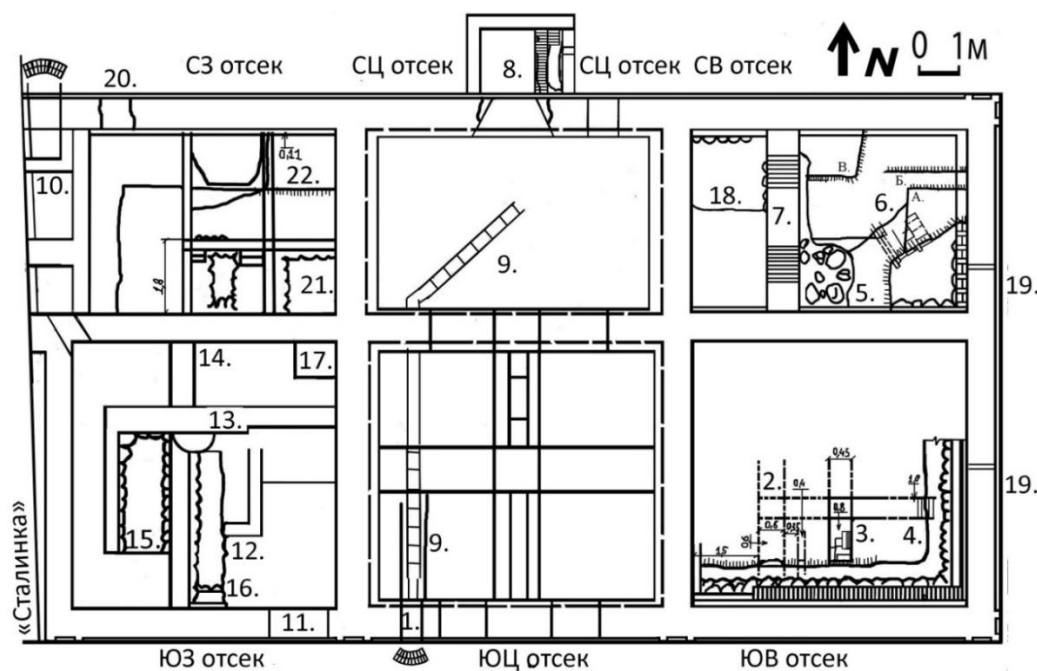
³ Принято читать Гранд Отелем сохранившееся сегодня здание дома № 5 по проспекту К. Маркса, но согласно данным И.П. Дейниса непосредственно гостиница размещалась в доме № 3, на месте «Сталинки». Такая путаница связана с тем, что оба здания не только имели общую стену, но и первоначально были некогда связаны друг с другом в единый комплекс, что выяснилось в ходе их натурных исследований.

казино, после его закрытия здесь разместили столовую народного питания, а с 30-х гг. XX в. помещения занял райком комсомола. На втором этаже, видимо, располагалась часть кабинетов облисполкома [1, с. 105].

В годы Великой Отечественной войны (1941–1944 гг.) «Отель» выгорел изнутри и, как показали натурные исследования, серьезно пострадал от взрывавшихся вблизи бомб и снарядов – растрескались внешние стены, «провисли» клинчатые перемычки некоторых оконных проёмов. После освобождения Полоцка в 1944 г. помещение было восстановлено силами Облпотребсоюза. Позднее «Отель» передали торговой школе, преобразованной сначала в кооперативный техникум, а затем – в политехнику. По данным И.П. Дейниса планировка этажей здания была полностью изменена в 1971 г.: появились металлические перемычки всех оконных и дверных проёмов, бетонные перекрытия и лестница, перегородки в половину кирпича. Тогда же сделали полы из мелких цветных глиняных квадратных плиток, изготовленных на одном из заводов Минска. С 2000-х гг. изучаемое нами здание было расселено и длительное время пустовало [1, с. 106; 3, с. 109–111].

Новый владелец здания (заказчик, ООО «Форт кей») принял решение о реконструкции и приспособлении строения для размещения гостиницы. После длительного периода запустения с весны 2019 г. были начаты исследовательские работы и подготовка к составлению проекта. Поскольку количество графических и письменных источников по истории изучаемого здания оказалось крайне ограниченным (имелись проект восстановления здания от 1874 г. и ряд чертежей БТИ), недостаток сведений предполагалось восполнить детальными натурными исследованиями памятника. С этой целью на всех этажах делались зондажи для выявления следов разновременных закладок, штукатурных и красочных наслоений, конфигурации дверных и оконных проёмов. Полученные данные предполагалось использовать при поэтапном проектировании. Раскрытия на стенах и шурфы под полами показали, что число переделок в здании намного больше известных и они связаны с катаклизмами XX в. Строительные шурфы и укрепления фундаментов позволили обнаружить не только ряд неизвестных ранее архитектурно-исторических конструкций, но и артефакты, связанные с обитателями дома, историей располагавшихся в нём учреждений.

Исследования подвалов. В ходе исследований выяснилось, что помещения подвалов располагались только в центральной части изучаемого нами дома (рисунок 2).



1. – оконце для вывода дренажа из подвала в сторону Западной Двины; 2. – остатки западной стены здания XVIII в.; 3. – фундамент печи-«стенки» XVIII в. с поставленным на неё изразцом; 4. – арка в составе фундамента поперечной стены XVIII в.; 5. – фундамент рухнувшей изразцовой печи конца XIX в.; 6. – стенки рухнувшей изразцовой печи конца XIX в.; 7. – арочное основание капитальной стены конца XIX в.; 8. – приямок и лестница входа в подвал, нижняя часть конца XIX – начала XX в.; 9. – керамический дренаж середины XX в.; 10. – выгребная яма первоначальной уборной XIX в., приспособленная для вывода канализационных труб в XX в.; 11. – прорубленный в начале XX в. новый главный вход в здание на месте окна XIX в.; 12. – опорная стенка начала XX в.; 13. – стены для опоры лестничных маршей XIX в.; 14. – остатки арки под лестницу XIX в.; 15. – лестничная площадка перед лестницей начала XX в.; 16. – нижняя площадка перед входом и лестничные марши начала XX в.; 17. – шурф; 18. – часть помещения с кирпичным полом в «ёлку», фундаментом печи конца XIX в., залитого в XX в. цементом; 19. – отдушины под деревянный пол XIX в.; 20. – пролом (XX в.); 21. – остатки кухонной плиты конца XIX в.; 22. – место концентрации фарфора «Граднера» XIX в.

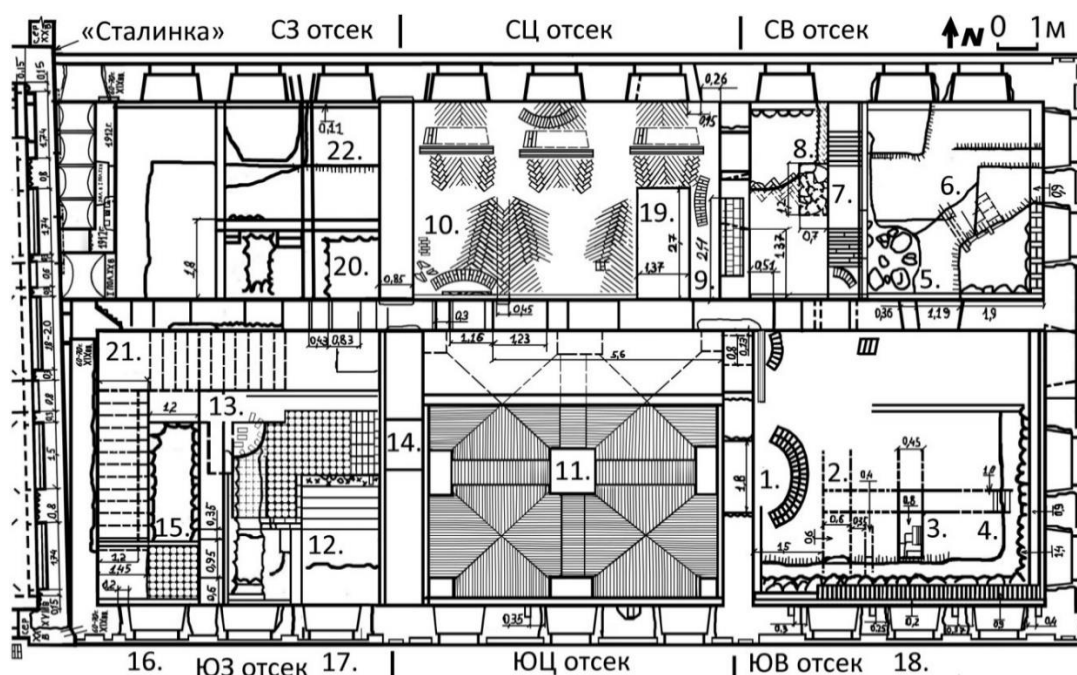
Рисунок 2. – План «Отеля» на уровне подвала и фундаментов

Отсек южный центральный (ЮЦ) со столбом и перегородкой посередине был изначально разделён на два помещения. Его кирпичные стены и своды оштукатурены известковым раствором и побелены, вероятно, позднее. В южной стене западного помещения на уровне современного цементного пола прослежена кладка кирпичной арки. Бетон перед ней наиболее ветхий, и там была сделана врезка для расчистки её заполнения. Выяснилось, что это бойница для вывода дренажа за пределы сооружения в сторону Западной Двины шириной около 0,5 м и высотой около 0,45 м (от уровня дна бетонного лотка). Линия дренажа была ориентирована на ул. Ленина (ранее ул. Вознесенская). Выявленная конструкция выполнена из цемента, имела плоское дно и наклонные стенки с вертикальными бортиками. В лотке уложены терракотовые керамические трубы с клеем «WEROPAJEWO (WEROPAJEW)». Дренаж вёл на север на уровне подошвы (вероятно прорубленной) внутренней несущей стены здания. Бойница с дренажом была заполнена мусором, среди которого найдены гранёный стакан с надписью на дне «Н. Борисов с/з Дзержинского», изготовленный в 1940–1941 гг., и обломок бортика агитационной тарелки, но фрагментарность изображения не позволяет её интерпретировать (рисунок 2: 1, 9).

Отсек северный центральный (СЦ) занимал обширное помещение подвала с лотковым сводом с распалубками. Пол помещения был также цементным. Найденный выше дренаж в нём проходил по диагонали и был ориентирован на вход со стороны двора. В северо-восточной части северной стены подвала имелось окно, в центре – вход с улицы. Первоначальные очертания обоих проёмов были утрачены в XX в. при неоднократных растёсках и перекладках.

Для устройства входа в подвал со стороны улицы к фасаду здания был пристроен кирпичный приямок с лестницей, обращённой на восток. Высота его западной и северной стенок прослежена на 1,0–1,2 м, восточная стена, где находилась дверь, не сохранилась. Фрагменты ступеней в виде выкладок из поставленного на кромку кирпича позднее в XX в. ремонтировались цементом. Пол приямка (ныне залит цементом), вероятно, был поднят на значительный уровень по сравнению с подвальным, поэтому существующий проём входа имеет бетонные ступеньки и неоднократно перестраивался (рисунок 2: 8).

Исследования под полами здания показали, что в восточной и западной его частях подвалы не размещались (рисунки 2 и 3).

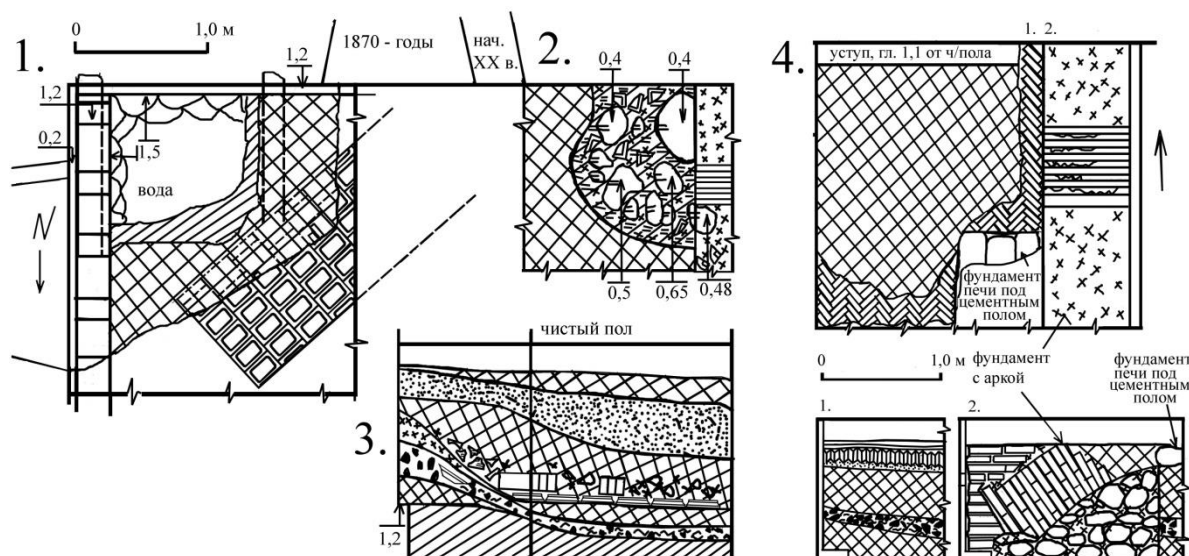


1. – арка, прорубленная в начале XX в.; 2. – остатки западной стены здания XVIII в.; 3. – фундамент печи-«стенки» XVIII в. с поставленным на неё изразцом; 4. – арка в составе фундамента поперечной стены XVIII в.; 5. – фундамент рухнувшей изразцовой печи конца XIX в.; 6. – стенки рухнувшей изразцовой печи конца XIX в.; 7. – арочное основание капитальной стены конца XIX в.; 8. – часть помещения с кирпичным полом в «ёлку» с фундаментом печи конца XIX в., залитого в XX в. цементом; 9. – вырубленная в первой пол. XX в. кухонная ниша с изразцовой выкладкой; 10. – пазуха свода подвала с артефактами середины XIX в., приспособленная для вывода канализационных труб в XX в.; 11. – пазуха свода подвала на месте столба XIX в.; 12. – опорная стенка и лестницы от замурованного входа начала XX в.; 13. – стены для опоры лестничных маршей XIX в.; 14. – место входа в ресторан начала XX в.; 15. – лестничная площадка перед лестницей начала XX в.; 16. – замурованный первоначальный вход в здание; 17. – прорубленный в начале XX в. главный вход; 18. – место дополнительного входа в здание; 19. – основание под плиту или печь первой половины XX в.; 20. – основание под плиту начала XX в.; 21. – остатки лестничной площадки, прорубленный наискось проход XIX в.; 22. – место концентрации фарфора «Граднера» XIX в.

Рисунок 3. – План «Отели» на уровне подполий

Под полами **юго-восточного (ЮВ) отсека** здания заполнение подполья начиналось с уровня 15–20 см от чистового пола. Траншеи, вырытые строителями вдоль южной и восточной стен шириной около 1,5 м и глубиной около 2,0 м, показали, что культурные отложения под чистовыми полами здания начинаются слоем строительного мусора толщиной 10–15 см, под которым был обнаружен слой остатков пожара с обломками известковых профилированных тяг, окрашенной штукатурки, штампованного кафеля и редкими обломками фарфора (блюдец с клеймом «СТК» и плошка с клеймом «КРМ») [3, с. 182, 183; 4, с. 56, 164]; толщина – 0,25–0,35 м. Под слоем пожара прослежены прослойки песка и второго слоя пожара толщиной до 10 см, длиной около 2,0 м. Глубина залегания – 0,5–0,7 м от чистого пола. Перепады между центральной и прилегающей к стенам частями – около 0,2 м. На поверхности кладки южной стены также есть его отпечатки. Под ними начинался сплошной завал из разновременного кирпича, черепицы и терракотовых изразцов XVIII–XIX вв. (см. рисунки 2: 2, 4 и 3: 2, 4). Дальнейшие расчистки показали, что под завалами находятся прослойки угля, которые местами переходят в тёмно-серую землю, перемешанную с углем и золой. На глубине 0,9 м от чистого пола под ними начинаются остатки кирпичного дома конца XVIII в., которые заслуживают отдельного описания.

Исследования в **северо-восточном (СВ) отсеке** начинались с шурфов, вырытых строителями для обследования и усиления фундамента (рисунок 4). Данный отсек разделён перегородкой на два помещения. Меньшее из них имело залитый цементом пол и полосу балластной земли между ним и перегородкой, разделявшей отсек. При удалении заполнения данной полосы шириной около 0,7 м и в северо-восточном углу помещения выявлены выступы углов кирпича. Расчистка в этом углу выявила кирпичную кладку, часть которой была расположена под углом и могла принадлежать кирпичной арке (рисунки 2: 7; 3: 7).



1. – строительный шурф; 2. – развал печища начала XX в., 3. – профиль северо-западной стенки шурфа; 4. – строительный шурф в меньшем помещении отсека (вверху), его восточная стенка до и после обрушения (внизу)

Рисунок 4. – Схема шурфов северо-восточного отсека

Позднее массив культурных отложений, находящихся под полами данной части здания, был выбран на глубину до 1,4 м от чистового пола. От образовавшегося уровня поверхности строителями были вырыты траншеи вдоль южной, восточной и северной стен для усиления их фундамента.

Шурф в северо-западном углу меньшего помещения, сделанный для изучения фундамента двух стен, показал, что цементный пол в нем находился на глубине около 15 см от чистого пола остальной части здания. Существующее покрытие состояло из двух слоёв стяжки по кирпичному полу в «ёлку», под ним размещалась песчаная подушка толщиной 3–4 см, а далее начинался завал строительного мусора (рисунок 4: 4). В юго-восточной части шурфа на уровне кирпичного пола прослежена булыжная выкладка, имевшая правильные очертания и тщательную подгонку камней. Ширина расчищенной стороны около 0,7 м; она ранее примыкала к арке. Возможно, это была небольшая плита или печь (см. рисунок 4: 4). Под песчаной подушкой кирпичного пола начинался слой строительного мусора толщиной около 0,4 м, очень неустойчивый, склонный к внезапному обрушению. На поверхности кладки северной и западной стен шурфа прослежены очертания слоя пожара в виде черной кривой полосы на глубине около 0,6 м от цементного пола у северной стены. На западной стене он имел уклон в южном направлении. В южной части шурфа слой пожара размещался на глубине 0,8 м, содержал крупные угли до 10 см в диаметре. На уровне слоя пожара, на глубине 0,7 м от бетонного пола (0,9 м от чистого пола), найдены редкие обломки фарфоровых тарелок и письменного(?) прибора. Толщина слоя пожара

0,25 м, но в направлении к кладке северной стены он сужается, ниже начинался завал слоя строительного мусора с артефактами XIX – начала XX вв. толщиной от 0,6 до 0,9 м. Среди находок примечательны обломки белого штампованного кафеля и фрагмент дна тарелки с надписью «Villeroy» [4, с. 222]. Ниже начинался слой тёмно-серой влажной земли, в которой найдены артефакты XVIII–XIX вв. – обломки донца сосуда и крышки с пятнистой глазурью.

Обрушение культурного слоя с восточной стороны шурфа выявило, что и кирпичный пол, и оба слоя стяжки примыкали к найденной нами арке. Расчистка позволила выявить пята огромной арки, замок которой первоначально возвышался над чистым полом помещения на расстоянии около 0,6 м. Кладка арки имеет ширину около 0,45 м и толщину в 2 кирпича (см. рисунок 4: 4). Перевязок с остальными стенами здания арка не имела, ряды кладочных швов не совпадали. Пята частично опиралась на выступ северной стены, частично – на каменно-кирпичную прикладку. Арка имела лучковые очертания, пространство под ней заполняли ряды камней диаметром до 30 см, данная конструкция встроена в состав существовавших стен помещения позднее – её кирпич разноразмерный. Таким образом, она была основанием несущей стены. Расчистка завалов в большей части отсека показала, что стратиграфия культурного слоя схожа с описанной выше (рисунки 2: 18; 3: 8).

В юго-восточном углу строители вырыли ещё один шурф для изучения фундамента. Зачистка участка культурного слоя западной и частично северной стенок шурфа показала, что до глубины от 1,2 до 1,4 м он представляет собой завал строительного мусора и песка, неустойчивый и склонный к обрушению (см. рисунки 3 и 4: 3). На глубине от 0,7 до 1,3 м от чистового пола завал пререзает прослойка пожара толщиной до 20 см, у стен прослойка прослеживается на глубине 0,5 м, ближе к центру помещения отсека – на глубине до 1,3 м. Над пожаром найдены обломки фаянсовой посуды и стекла со следами воздействия огня (см. рисунки 3 и 4: 3). Ниже, на глубине 1,0–1,2 м от чистого пола найдена рухнувшая кирпичная стенка печи с облицовкой изразцами. Она лежала в горизонтальном положении по диагонали помещения. Под изразцами, ближе к центральной части помещения, начинался кирпичный бой, крупные обломки печной глины с отпечатками небольших расколотых вдоль брёвен, противоположная поверхность которых была ровной (см. рисунки 3 и 4: 3). Ниже завалов подполья, с глубины 1,4 м от уровня чистого пола помещения начинался культурный слой тёмно-серой влажной земли, в которой найдены артефакты XVIII – начала XIX вв. – обломки изразцов, черепицы и подсвечника.

Шурф в северо-западном углу большего помещения возле перегородки выявил часть арки, расчищенной со стороны меньшего помещения данного отсека. Повторные обследования подтвердили, что она была встроена в существующий контур фундаментов позднее и не имеет с ним перевязки (см. рисунки 2: 7; 3: 7). На глубине около 0,3 м от чистого пола перпендикулярно ей прослежены деформированные в 1–2 ряда кладки толщиной 0,2 м, ниже которых размещалась клиновидная прослойка мусора с большим количеством белой извести, далее следовал песок толщиной от 1,0 до 0,2 м и слой серой земли с углями, кирпичным боем, штукатуркой, известью, оплавленным стеклом. В слое встречаются редкие обломки посуды и изразцов XVIII – конца XIX вв. У самой арки на глубине около 1,0 м от чистого пола обнаружено скопление извести и кирпичного боя, где найдена головка фарфорового подсвечника. С глубины около 1,15 м от чистого пола концентрация извести сильно возросла, встречались кирпичи-пальчатки, штукатурка, угли и оплавленное стекло.

В ходе полной расчистки подполья большей части помещения СВ отсека на глубине 0,8–0,9 м от чистого пола в коричневом слое и сером у восточной стены найдены обломки профилей и штукатурки со стен с побелкой и покраской, возможно, окрашенная лепнина (шуба?). Там же найден белый обгоревший изразец с надписями. Ближе к центру комнаты данные слои уходят вниз. С глубины 1,0 м начинается слой серой земли с золой и пеплом, имеющий уклон к центру помещения. В нём на глубине 1,2 м (в 1,5 м от восточной стены) найдено продолжение рухнувшей стенки кирпичной печи с белым кафелем, под которой обнаружили обломки глиняной обмазки с отпечатками полукруглой поверхности плах. Выше стенки печи найден цокольный изразец с белой (обгоревшей) эмалью. Там же, среди извести и раствора, найдены обломки разнообразных карнизов и перемычек с белой эмалью, в сером слое под изразцами – большие гвозди от пола, деталь отопительных устройств.

В юго-западном углу помещения обнаружены остатки основания рухнувшей печи – скопление камней на сырой глине. С глубины 0,4 м в них размещались обломки кирпича, штампованного кафеля (с клеймами) и куски обожжённой глины. Прослежены имена владельцев изразцовых заводов – Аперовичь, Будниковь (клейма двух видов). Известно, что первые изделия современного образца были произведены в 70-х годах XIX в. на заводах Будникова [5, с. 147–148]. Некоторые пластины имели следы распиловки и надрезы. Там же обнаружены и мелкие обломки различных видов карнизов и профилей. Между основанием и южной стеной помещения есть пространство около 0,3 м шириной, заполненное обломками изразцов с клеймами. Они выявлены на глубине до 0,3 м от чистого пола. Возле юго-восточного угла печица найден обломок тарелки и письменного прибора(?). На глубине 0,4 м обнаружили печь, что основание печи на уровне нижней части каменной кладки имеет перевязку со стеной и аркой, разделявшей большее и меньшее помещения отсека, но большая его часть выполнена насухо из больших камней. Габариты площадки выкладки на глубине 0,5 м с учётом камней верха – около 1,0 × 1,0 м, что соответствует основанию квадратной комнатной печи. Признаков треугольной печи, отмеченной на проекте здания 1874 г., не обнаружено ни в виде фундамента, ни в виде притёсанных или сформованных специальным образом изразцов. Это говорит о его более позднем происхождении (рисунки 2: 5; 3: 5)

К камням кладки основания печи примыкал серый слой с примесями золы и пепла, в котором также обнаружена рухнувшая стена упомянутой ранее печи. До глубины 0,7 м от чистого пола вокруг печи и вдоль стен найдены обломки известковых профилей. Дальнейшие раскопки вокруг камней печища показали наличие обломков обгорелого дерева, возле северо-восточного угла печи найден обломок сосуда со следами зелёной краски и изразцы с посеребшей (обгоревшей) эмалью, залегавшие на глубине 0,7 м в слое серой земли (рисунки 3: 5 и 4: 2). Зачистка вокруг кладки основания печи на уровне 0,7–0,8 м от чистого пола показала, что кладка камней вместе со стеной была врыта и встроена в имевшийся к тому времени слой заполнения подполья. Камни пересыпаны(?) слабым раствором с обломками кирпича в качестве клиньев и изразцов конца XIX – начала XX вв. У южной и западной стен с аркой на глубине около 0,7 м найдены обломки окрашенных профилей. Штукатурка с фрагментами краски серо-голубого цвета найдена в сером слое над рухнувшей стенкой изразцовой печи. В верхней части и коричневом слое над ним найдены обломки штукатурки лилового и серо-голубого окраса. Такие же колеры имеют изразцы, примыкавшие к стенам печи, которая в рухнувшем состоянии найдена нами в слое серой земли. Дальнейшая выборка слоя и разборка стенки рухнувшей печи показала, что общая ширина изразцовых кладок достигает 1,5 м, что соответствует развороту двух стенок согласно фундаменту печи, высота рухнувшей части достигала 2,0 м, причём сохранились выкладки только стеновых изразцов. Угол двух стенок обнаружить не удалось. Остатки двух угловых изделий найдены только в северо-восточном конце развала (рисунки 3: 6 и 4: 1).

Дальнейшая расчистка показала, что ширина рухнувшей кладки печи была равна развороту двух стенок. Высота составляла около 2,0 м, восточная стенка печи была выполнена в полкирпича, северная – в четверть (на ребро). Возле северо-восточного угла печи могла располагаться конструкция, на что указывает отсутствие угловых изделий с данной стороны, а пластины стеновых имеют покраски. Это мог быть столб для поддержания балки потолка, принимавшей на себя часть нагрузки от печи второго этажа.

В слое чёрной (тёмно-серой) земли, подстилающей развал печища, найдены большинство обломков терракотовых и зелёноглазурованных красноглиняных гладких изразцов волнистой черепицы и глазурованной расписанной ангобом посуды конца XVIII–XIX вв. Западная часть развала печи была перемешана. В его нижней части, в извести были найдены обломки чашки, бронзовые изделия (в частности, колёсики от тележки(?)) и фрагмент потолочной розетки в виде профиля. Там же найдены обломки серо-голубой штукатурки с отпечатками драпки на обратной стороне. Пространство между булыжниками стены с аркой заполнял известковый раствор, преобладавший в верхней части бута. Между камнями найдены обломки кафеля начала XX в. и глазурованной черепицы XVIII в.

Подосва основания арки залежала выше уступа первоначальных стен здания на 15–20 см. Выяснилось, что при её возведении в земле была вырыта траншея, которую заполнили камнем и для прочности подсыпали верхнюю часть культурным слоем. Далее с помощью выкладок кирпичом придали поверхности вид опалубки для арки, которую выполнили из кирпича. Под слоями, образовавшимися в ходе строительства здания, на глубине 0,3 м от выступа начинался перемешанный культурный слой с артефактами XVII – начала XIX вв. – гладкие и медальонные изразцы. В нём были вырыты фундаментные траншеи для устройства булыжного фундамента существующего здания (см. рисунки 2: 7; 3: 7).

В южном центральном отсеке здания при полной расчистке пазух свода над помещениями подвала были найдены обломки белого эмалевого кафеля от стоявшей здесь печи, но фундамент её обнаружить не удалось. Найдены также и фрагменты глиняного кубка. В советское время по сводам установили столбики для опоры лаг деревянного пола, в кладке одного из них найден кирпич с надписью «EXTRA», сами своды опирались на центральный столб подвала и были выполнены в полкирпича продольно-поперечными рядами, которые опирались на Т-образные подпружные арки (см. рисунок 3).

Расчистка пазух свода подвала северного центрального отсека в северо-восточном углу свода выявила обломки белых эмалевых стеновых изразцов (рисунок 3: 11).

Расчистка пазухи свода юго-западного угла помещения позволила выявить под слоем коричневой земли толщиной 10–15 см завал строительного мусора – обломки штукатурки, угля, повреждённые огнём обломки стеклянной и фарфоровой посуды, медные накладки замков, обломки столовых приборов. Центральная южная пазуха свода практически полностью была заполнена выкладкой из кирпича, расчистка показала, что это могла быть кладка основания плиты или печи. Из кирпича был выполнен контур основания печи, середина которого была заполнена кирпичным боем. Расчистки в северной части свода находок не выявили. В ходе расчистки юго-восточной части свода была обнаружена кирпичная площадка, примыкавшая к южной стене здания, 1,3 × 2,7 м, при этом рёбра жесткости свода были частично срублены. Между восточной стеной отсека и площадкой в завале был найден пузырьёк (рисунок 3: 10 и 19). Сам свод имеет сложную конструкцию, его диагонали (соединения лотков и края) имеют усиленную гуртами кладку, частично в ёлку (см. рисунок 4).

Исследования под полами **в юго-западном (ЮЗ) отсеке** начались с шурфов строителей (рисунок 5).

Первый был вырыт рабочими в углу возле несущей капитальной стены. При этом ими были выломаны ступени сборной бетонной лестницы, ведущей вниз с запада на восток. На глубине около 0,8 м от чистого пола прослежена залитая цементом площадка, она деформирована. Далее велась полномасштабная расчистка

найденных конструкций, поскольку предполагалось, что это мог быть вход в подвал. При этом выявлена ещё одна, аналогичная найденной, лестница, но ведущая не вниз, а вверх (рисунок 3: 12). Завал, выбираемый при их расчистке, содержал, кроме обломков бетонных и гранитных ступенек, фрагменты плиток пола, фрагмент литых перил лестницы и бутылку, оставшуюся после рабочих 70-х годов XX в. Некоторые из гранитных изделий имели на торце следы оштукатуривания и зелёную раскраску, подобную той, что была у расчищенных стен. Один образец имел на торце фрагмент побеленной штукатурки. Это говорит о том, что из этих ступеней набирались марши главных лестниц гостиницы внутри подъезда. Максимальная сохранившаяся длина гранитной ступени составляла 1,48 м (см. рисунок 3: 12). Одна из найденных бетонных ступеней длиной 1,05 м могла быть связана с проёмом, разделявшим изучаемый отсек в несущей капитальной стене. Там же был найден фрагмент кладки – сбитый угол бортика стены, ограждающей лестницу со стороны помещения, окрашенный в зелёный цвет одинакового оттенка с тем, что сохранился на раскопанных стенках. Вся конструкция состояла из двух лестниц, площадки и полов, была деформирована и просела в средней части, поскольку не имела глубокого основания, будучи поставленной на слой завала мусора в подполье (см. рисунки 2: 12, 16; 3: 12; 5: 1).

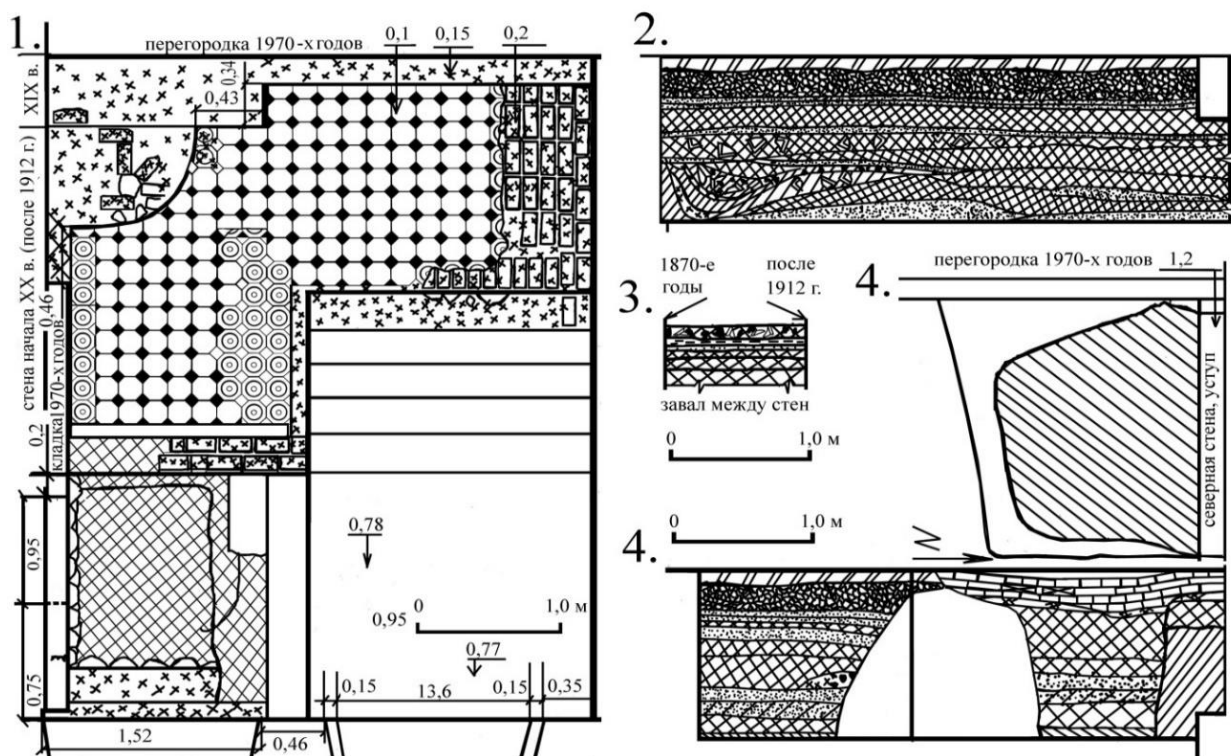


Рисунок 5. – 1 и 3: отсек ЮЗ: 1. – лестницы от главного входа и плиточный пол, созданные после 1912 г., с контурами первоначальных стен; отсек СЗ: 2 и 4 – стратиграфия культурного слоя под полом: 2. – с прослойкой пожара 1871 г. (с фарфором Гарднера), 4. – в строительном шурфе

При усилении бутового фундамента несущей капитальной стены в траншее, кроме артефактов XVIII в., были найдены терракотовые изразцы с нанесенными на них несколькими слоями побелки. Такие изразцы характерны для первой половины XIX в. и связаны с конструкцией первоначальных печей изучаемого здания.

В юго-западном углу ЮЗ отсека и на восток от несущей капитальной поперечной стены, возведённой после 1912 г., а также перегородки 70-гг. XX в. сохранились остатки пола. Его глубина от уровня чистого пола составляла около 0,1 м. Расчистка возле поздней перегородки и капитальной стены, разделяющей отсек на восточное и западное помещения, показала следы примыкания пола к утраченным ныне стенам и конструкциям XIX в. Края пола содержали усиление цементной обмазкой, образующей их контуры, выкружки и выступы которых позволяют предполагать на их месте наличие камина или печи. Найдены также побеленные отломки штукатурных профилей вогнутой формы с отпечатками дражки, набиваемой на деревянные потолки и стены (рисунки 2: 13, 14; 3: 13, 15).

Рытьё шурфа в северо-восточном углу помещения показало, что до глубины 0,5 м от чистового пола слой перемешан. В нем содержались обломки белого кафеля с клеймом завода Будникова. Там же была найдена и аптечная банка (рисунки 2: 17; 5: 3). После снятия плиточного пола 60–70-х гг. XX в. и стяжки, в существующем подъезде здания были обнаружены две стены: капитальные перегородки толщиной в 1 и 2 кирпича. Они служили опорами гранитным ступеням и своду лестницы, отмеченной на плане здания 1874 г. (на рисунке

перегородки показаны как вновь возводимые), при этом часть их кладки XIX в. сохранилась на высоту около 1,2 м от чистового пола в составе более поздней стены, возведённой после пожара 1912 г. (см. рисунок 3). Выборка слоя в подъезде, на запад от несущей стены, построенной после 1912 г., подтвердила наличие стены XIX в.: её кладка была толщиной не менее, чем в полтора кирпича. Расстояние от стены, построенной после 1912 г., (на уровне кирпичной кладки) до неё около 1,2 м.

Заполнение между стенами до глубины 0,4 м представлено слоем строительного мусора и пожара толщиной около 10 см с обломками глиняной и фаянсовой посуды 20–30-х гг. XX в. с советскими клеймами, кроме них найдены замок и бронзовые накладки и ручки, расплавленные бутылки и проволока. Следующий слой обожжённой глины и песка имел толщину около 5–7 см, под ним размещалась угольная прослойка в 2–3 см, ниже которой следовало два слоя мусора по 10,0 см каждый. С глубины 0,35 – 0,4 м начинался завал из кирпича и строительного мусора. С глубины 0,5 до 1,0 м прослежен слой пожара 1912 г., в котором были найдены обломки терракотовых и белоэмалевых изразцов, оплавленное стекло и редкие обломки фарфора и фаянса со следами огня. Бутовые фундаменты стен с запада, севера и востока продолжались. Кладка восточной стены на глубине 1,0 м от чистого пола имела расширение, продолжавшееся до глубины 1,5 м, на этом же уровне фундамент северной стены заканчивался. Ниже кладка шла на конус и сужалась. Высота составляла около 0,2–0,3 м. В ходе выборки слоя ниже глубины 1,0 м начиналась тёмно-серая влажная земля, в которой были найдены артефакты XVIII в., полная выборка слоя была доведена до глубины 1,5 м. В южной части подъезда под плиточным полом 70-х гг. XX в. частично сохранился плиточный пол начала XX в., уложенный после пожара 1912 г.

Откопка фундамента стены 1912 г. с восточной стороны от шурфа показала, что под плиточным полом, под стяжкой, имеется выстилка кирпичом (рисунок 5: 1), под которой находился мощный слой строительного мусора – кирпичного боя и раствора – толщиной 0,4–0,5 м, переходящий в слой тёмно-серой земли толщиной 0,2–0,3 м с обломками терракотовых гладких изразцов XIX в. и углями (на границе со строительным мусором). Ниже следовал слой песка. Глубина залегания ограждающих лестницы стенок незначительная, общая их высота с учётом утраченной верхней части около 1,2 м, что и стало причиной их проседания и деформаций. Здесь также найдены артефакты XVIII в. (см. рисунок 3: 12).

Вырытые строителями шурфы в **северо-западном (СЗ) отсеке** возле разделяющей его на два помещения перегородки показали наличие под бетонной заливкой (толщина 10–12 см) слоя мусора (толщина 0,15–0,2 м), переходящего в слой мусора с другим оттенком (толщина около 0,5 м). Под ними на глубине 0,8 м прослежен слой угля. Далее следовали десятисантиметровый слой песка, слой песка с другим оттенком такой же толщины и слой мусора толщиной 10–15 см. Общая толщина наслоений от бетона до нижней границы этого слоя мусора составила 1,3 м. Ниже начиналась сырая чёрная земля с материалами XVII–XVIII вв. Северная стена имела выступ около 18 см шириной (рисунок 5: 4).

В ходе начала выборки культурного слоя из траншей до уступа стены (1,2 м от чистового пола), стратиграфия заполнения представлена слоями, отложившимися за время ремонтов и реконструкций помещений. Под бетоном и слоем гравия (общая толщина до 0,4 м) до глубины 0,8 – 0,9 м от чистого пола прослежена прослойка песка толщиной до 5 см, длинной около 2,2 м. Последующий слой строительного мусора толщиной до 0,3 м в центральной части к восточной стене (подвал) резко сужался. Далее с глубины 0,8–0,95 м под ним следовал мощный слой пожара длинной до 3,7 м. Толщина слоя доходила до 0,4 м в восточной части. В верхней части преобладал строительный мусор с редкими обломками фарфора и терракотовыми гладкими изразцами. В нижней части, в основном, была обнаружена известь, обломки серой штукатурки, аналогичной находкам в СВ отсеке. В данной части слоя на длину до 2,0 м найден завал повреждённой огнём фарфоровой и керамической (ближе к западной части помещения) посуды (рисунок 3: 22). Часть посуды была перемешана с углём. Большая часть посуды (тарелки) отличалась профилем от современных изделий. На тарелках имелось плохо оттиснутое клеймо Гарднера 30–70-х гг. XIX в. с изображением св. Георгия [3, с. 44–46, 71]. Остальная часть слоя пожара более перемешана и находок не содержит. Остальная посуда представлена обломками молочника и крышки. Данный слой подстилала прослойка чёрной земли толщиной 10 см и длинной до 3,7 м. Под ним начинался песок с неровной поверхностью, прорезанный местами до 20 см. В слое над пожаром преобладали белоэмалевые фабричные изразцы. Над этими слоями прослежены остатки ещё одного пожара, вероятно, оставшегося после 1912 г. (рисунок 5: 2). В западной и южной частях помещения данный слой пожара был намного ближе к поверхности, залегал от чистового пола на глубине от 0,5 м (с северной части) до 0,3 м (в южной части помещения), часть слоя была уничтожена при возведении кирпичной перегородки в 70-х гг. XX в. Там собраны фрагменты супника, тарелок, блюдца, кроме обычной керамики, найдены обломки бутылок из «каменной массы». Попытка добрать данный слой показала, что в центральной части помещения фарфор практически не встречается. Возле разрушенной перегородки 70-х гг. XX в. была найдена кладка на глиняном растворе на глубине 1,0 см от поверхности засыпки, расположенная в верхних её слоях. Кладка сохранилась на 3 ряда кирпича, частично поставлена на мелкий булыжник, частично – на культурный слой и прослежена на длину более 1,6 м.

Врезка в юго-восточном углу помещения признаков слоя пожара с фарфором не выявила. На глубине 0,7–0,8 м начинался слой извести с мелким булыжником – основа под печь. Дальнейшие шурфовки показали,

что с глубины 0,4–0,5 м начинаются булыжные и деформированные кирпичные кладки, в них прослежены две полости, заполненные землёй и кирпичным боем. Параметры западной полости – $0,7 \times 1,4$ м, в заполнении найдены обломки стеклянных пузырьков. Восточная – около $1,2 \times 1,2$ м – содержала обломки кирпича, один из которых – со следом собачьей лапы. В обеих полостях найдены редкие обломки фарфора и керамики, повреждённой огнём. Судя по кладкам и наличию этих артефактов, после пожара 1912 г. слой фаянса и керамики был частично уничтожен при строительстве дровяной плиты во время восстановления гостиницы (рисунок 3: 20). В это же время перестраивались каморы в западной части отсека, на старом фундаменте после 1912 г. строилась новая стена для отделения туалетов (возле неё в земле найден флакон от парфюмерии) (см. рисунок 5: 2).

Шурф, вырытый в северной части каморы для изучения туалета, обозначенного на плане здания 1874 г., выявил выгребную яму, заложенную кирпичом с улицы. Арка этого проёма лучковая, выполнена в два слоя по полкирпича. Высота до пяты 1,0 м от пола камеры, в замке 1,15 м (см. рисунок 2: 10). Со стороны помещения выбита и сохранилась крайне плохо, часть её обрушилась при раскопках. Под стеной арка забита небрежной кладкой из кирпича и камня. Западная сторона шурфа представлена продолжением постройки конца XVIII вв., на глубине 1,3 м она имела выступ, чередующиеся торцы и кромки кирпичей. На этом же уровне прослежен булыжный пол камеры, обмазанный известковым раствором. Над выступом первоначальная кладка с глубины 0,4 м от уровня чистого пола была вырублена и переложена в XIX вв., остальные две стены толщиной в кирпич выполнены с преобладанием рядов ложков и тычков (рисунок 2: 10). Первоначальное заполнение уничтожено при прокладке труб, на глубине 0,9 м найдены редкие обломки стеклянной и керамической посуды, остатки полусгнивших ботинок прошлого века.

Стены. Обследование первоначальных стен здания на уровне подполья показало, что их кладка однородная без следов ремонта, стены выложены из мелкого кирпича. На глубине 1,2 м от чистового пола помещения (от низа окна до него около 0,75 м) в северной, восточной и южной стенах имеются выступы шириной 20,0–32,0 см, ниже, на глубине 0,3 м от них, начинается бутовая кладка подошвы фундамента, уложенная «насухо». При изучении фасадной стороны восточной стены прослеживаются замурованные отдушины для проветривания подполья. В отсеках СВ и ЮЗ на поверхности кладки стен выше выступов имеются очертания слоя пожара в виде чёрной кривой полосы с перепадом уровней залегания от 0,7 до 1,3 м от чистового пола. В отсеке ЮЗ в фасадной южной стене здания имелся пробитый позднее и потом вновь замурованный дверной проём, переделанный в окно для поддержания симметрии фасада. Нижняя часть проёма располагалась на уровне расширенной залитой цементом площадки с двумя расходящимися лестницами (см. рисунок 3: 17).

Снятие штукатурки на южной стене обнаружило большие растёски откосов окон. Первоначальные клинчатые перемычки утрачены и заменены металлом – рельсами и швеллерами. Подоконные стены по южной стороне имеют устья первоначальных откосов (оконных ниш?), характерные для дверных проёмов. В простенках на уровне середины высоты окон прослежены гнёзда от строительных лесов. По фасаду центра все окна имеют растёсанные откосы, первоначальных перемычек не сохранили, поскольку их заменили железом. Ниже уровня их подоконников в отсеках ЮВ и ЮЦ имеются кладки первоначальных откосов (см. рисунок 3) дверных проёмов или оконных ниш 1,48–1,5 м шириной (рисунок 3: 18). На стыке ЮЗ и ЮЦ отсеков прослеживается штроба от поперечной стены, которая на плане 1874 г. не отмечена. В границах ЮЗ отсека стена также имеет ряд переделок. Нынешние восточное и западное окна там некогда были растёсаны и переделаны в дверные проёмы, связанные с располагавшимися в данном отсеке и не раз переделанными парадными лестницами. Западное окно сохранило целый западный откос с развёрнутой кладкой устья. Кирпич толще, чем в первоначальных кладках здания. Откос создан при закладке двери в начале XX в. На стенах прослежены остатки зелёной панели – последний ремонт перед замуровкой восточного дверного проёма в 70-х гг. XX в. Высота панели от раскопанного в шурфе бетонного пола – около 2,1 м, что подтверждает её фрагмент на откосе дверного проёма.

Окна в восточной фасадной стене первоначальных откосов и перемычек не сохранили. Судя по расчищенной кладке, окна были прорублены в более позднее время с таким расчётом, чтобы вписаться в декоративное обрамление на фасаде. Центральное окно было растёсано и переделано в дверной проём в 70-х гг. XX в.

По северной стене оконные проёмы на уровне первого этажа неоднократно растёсывались, переносились и переделывались в дверные в XX в. Восточное окно СЦ отсека имеет следы переделки из дверного проёма, сохранило первоначальный восточный откос и фрагмент кладки клинчатой перемычки, которая была на 3,0 см ниже нынешней. Центральное окно, возможно, прорублено. Под ним, прослежена разгрузочная арка над входом в подвал. Западное окно также частично сохранило фрагмент клинчатой перемычки, на 0,35 м ниже нынешней.

Западная стена в переделах ЮЗ отсека сложена из мелкого кирпича и на уровне первого этажа имеет косую штробу под врезку лестничного марша с подъёмом по южной стороне. При расчистке забивки штробы встречены обломки гранита от выломанных ступеней лестницы, ведущей на второй этаж. Со стороны лестничного марша в верхней части стены на уровне междуэтажного перекрытия зафиксированы обрезанные рельсы для сводчатого перекрытия (рисунок 6: 2). Маркером расположения последнего швеллера может служить замурованный проём второго этажа на этой стене. Там же, на высоте около 2,28 м от плиточного пола, прослеживается граница примыкавшей к поворотной площадке штукатурки (см. рисунок 6: 2). Восточные концы ступеней лестницы опирались на капитальные перегородки, основания которых найдены при усилении фундамента стены, построенной после 1912 г. (рисунок 6: 6).

Ряд перестроек претерпели и внутренние несущие стены здания.

В северо-западном углу в продольной стене здания, между отсеками ЮЗ и СЗ, имеется прорубленный наискось проём. Южная и западная его стороны сделаны в виде грубой забивки из целого и битого кирпича на известковом растворе. Внизу имелась заделанная в кладку цементной трубой. Поиски замурованного проёма для входа в соседнее здание начались с выборки данной забивки, что позволило расчистить поверхность фасада здания конца XVIII в. В основной расчистке найдена кладка XIX в., закрывающая стену XVIII в. Закрытая забивкой поверхность, примыкавшая к ней, имела швы с нарезкой. Расположение стены XVIII в. предполагает её продолжении в составе «Сталинки» (см. рисунки 3: 21 и 6: 2).

В продольной стене ЮЗ и СЗ отсеков имеется ряд переключков, связанных с переносами проёмов, отмечена срубленная пята лучкового свода(?). Его длина около 1,0 м (возможно, был шире). Конструктивно это, вероятно, связано с перестройками 70-х гг. XIX в. (см. рисунок 3), когда в этой части здания устроили Г-образную лестницу. Северная (продольная) стена сложена из мелкого кирпича имеет ряд переключков более крупным кирпичом начала XX в. и кладку пята срубленной арки. Вход в бывший санузел пробит позднее. Далее прослежена штроба от первоначальной поперечной несущей стены, не отмеченной на проекте 1874 г., стоявшей на границе ЮЗ и ЮЦ отсеков. Первоначальный дверной(?) проём располагался в северной стене по центру ЮЦ отсека. Ширина составляла около 1,3 м, имелась лучковая арка, высота проёма – около 3,1 м (до пята) и 3,25 м (в замке арки). Позднее в него встроили(?) клинчатую перемычку. Второй проём, более низкий с лучковой аркой, располагался западнее предыдущего. Восточнее прохода с высокой аркой были обнаружены остатки замурованной ниши(?) с клинчатой перемычкой. Продольная стена здания в юго-восточном отсеке также содержит переделки. В северо-западном углу отсека прослежен фрагмент арки под потолком в центральной части стены под балкой 60–70-х гг. XX в. сохранился фрагмент клинчатой перемычки проёма и прорубленного на его основе позднего проёма.

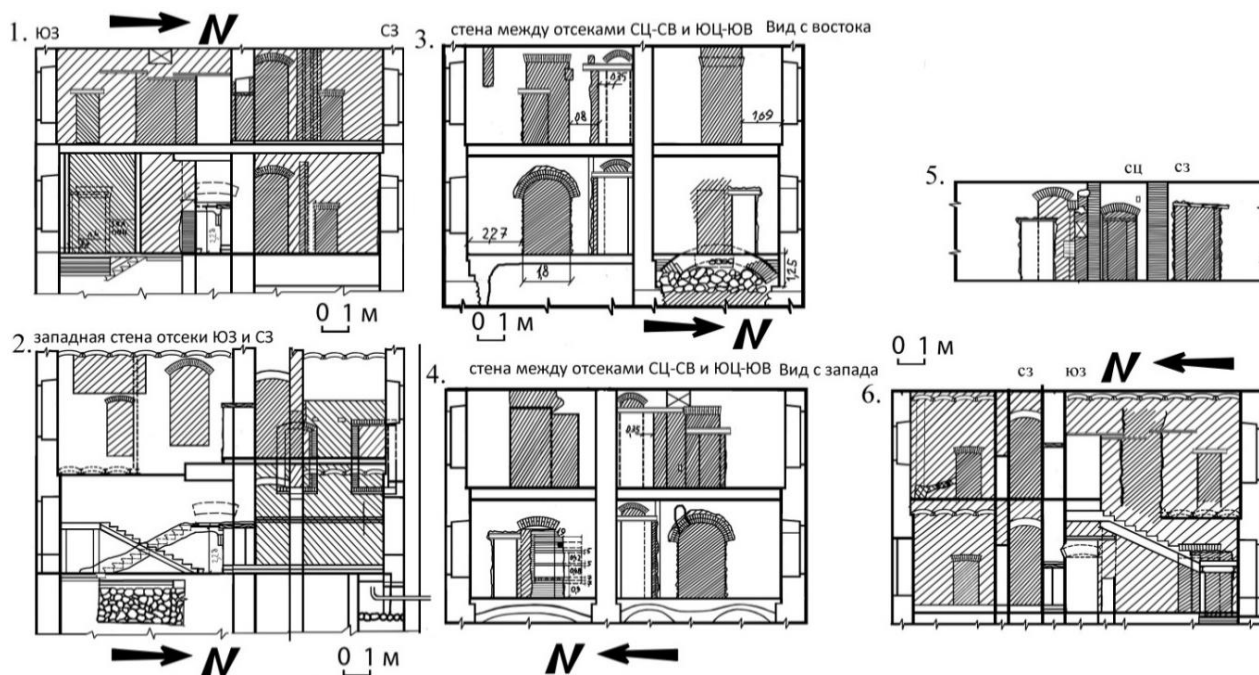


Рисунок 6. – 1 и 6. – развёртка поперечных стен в западной части здания; 3 и 4. – развёртка поперечных стен в восточной части здания; 2. – западная стена здания на стыке со «Сталинкой» с фрагментами фасада XVIII в.; участок продольной стены со стороны СЦ отсека на первом этаже

Стена между ЮЦ и ЮВ отсеками помещения имеет широкий проём с аркой, прорубленный в начале XX вв. (рисунок 6: 3, 4). Арка врезана в первоначальную кладку, а вертикальные откосы имеют рубленную поверхность кладки и покрыты белой штукатуркой. Ширина 1,8 м, высота 2,2 м в пята и 2,85 м в замке. В закладке арки было обнаружено большое количество котельного шамотного кирпича с надписью «EXTRA» и прямоугольными клеймами (рисунок 6: 3). В советское время арку повредили дымоходом. Северная часть стены имеет закладки, связанные с дымоходами и опорой для швеллера проёма коридора. Первоначально, по проекту 1874 г. и натурными исследованиям, стена имела дверной проём, в начале XX в. растёсанный в арку. Об этом свидетельствует её кладка из толстых кирпичей⁴ [6, с. 89]. Второй, более узкий, арочный проём находился в северной части стены, рядом с продольной, и предназначался под проёмную печь (см. рисунок 6: 3, 4 и 3: 1).

⁴ Гайдлей С.П. Жданов И. А., Княжев А.О. Старовинна таврована цегла як важливий історіографічний матеріал // Збереження історичної забудови центр Одеси шляхом включення до основного Списку всесвітньої спадщини ЮНЕСКО: матеріали Міжнар. навук.-практ. конф.: зб. навук. праць / редкол.: В.С. Дорофєєв. – Одеса: Астропринт, 2015. – С. 209–212 (см. с. 211).

Разделяющая сегодня юго-западный отсек несущая стена была возведена после пожара 1912 г. и частично перекрывала западный откос центрального окна (рисунок 6: 1). Со стороны лестницы вблизи окна в ней найден фрагмент перемычки дверного проёма. Как показали дальнейшие исследования, толщина стены была равна толщине кирпича. Первоначальная ширина заложённого проёма 1,3 м, позднее его растесали и переместили южнее, повредив перемычку, из-за чего стена треснула. Растёсанный проём имел ширину около 1,3 м. Эта стена, разделяющая подъезд и остальную часть отсека, из-за трещины получила усиление и прикладку из кирпичей на швеллерах для приёмки нагрузки от плит перекрытия 60–70-х гг. XX в. в её составе был обнаружен фрагмент первоначальной кладки для опоры под лестничные марши, запроектированные в 1874 г.

Со стороны лестничного марша (XX в.) в верхней части стены зафиксированы обрезанные рельсы для сводчатого перекрытия. Обнаружены срезы 3 опорных рельсов, расстояние между которыми незначительно различались. Последняя северная рельса была двойной для принятия распора всего свода и стоявшей выше перегородки (рисунок 6: 6).

Продольная стена со стороны северной части здания также сильно повреждена. В пределах северо-восточного отсека в её западной части имеется ряд перестроек. В центре стены прослежен большой дверной проём первоначальной ширины около 1,45 м, в помещение отсека он был обращён раструбом устья. Позже его сузили с помощью прикладки шириной 0,36 м до ширины 1,09 м. Западная часть продольной стены со стороны помещения имеет многочисленные перекладки и одновременные дымоходы. В юго-западном углу отсека прослежен вертикальный шов, возможно, откос ниши, большая часть которой уничтожена при перекладке стены, устройстве дымоходов и существующего входа. Над существующим дверным проёмом в западной части южной стены прослежена полуциркулярная арка шириной 1,0 м, располагавшаяся под самым потолком, и её откосы полностью утрачены. Далее, в границах северо-центрального отсека первоначальные проёмы продольной стены перебиты. По центральной оси стены проёма (ось симметрии здания), под самым потолком, прослежена лучковая арка шириной около 1,2 м с клинчатой перемычкой (западная пята уничтожена при пробивке проёма начала XX в.). С западной стороны найден заложённый проём с лучковой аркой, в XX в. он был уменьшен и потом полностью заложён. С восточной его стороны имеется срубленная кладка перегородки толщиной в кирпич с западной штробой от капитальной стены, разделявшей северо-центральный и северо-западный отсеки. Вся западная часть южной стены СЦ отсека демонстрирует ряд переделок первой половины XX в., включая ряд пробитых дымоходов и закладок. Одна из них выполнена из котельного шамотного кирпича с надписью «EXTRA», поставленного на ребро⁵ (см. рисунок 6: 5).

Продольная в пределах СЗ отсека стена повреждена при устройстве проёмов и дымоходов в XX в. Первоначальная кладка XIX вв. представлена в виде столбов различной ширины.

Капитальная поперечная стена между СВ и СЦ отсеками также неоднократно перестраивалась, существующий дверной проём поздний. От первоначального проёма XIX в. сохранилась лучковая перемычка длиной около 1,3 м и высотой около 2,7 м от уровня сбитого пола. Ниже перемычки обнаружено множество перекладок более толстым кирпичом (частично на глине). В ходе пробивки на месте нового дверного проёма найдена вырубленная в стене ниша. Её низ зафиксирован на высоте около 0,9 м от пола, высота ниши 1,0 м, ширина 1,9 м. Дно представлено слоем извести толщиной 7,0 см и выкладкой кафеля с клеймами заводов Будникова и Лисовского. Завод последнего работал в Витебске с 1877 по 1914 гг. [5, с. 147–148; 8, с. 88]. На высоте около 0,48 м имеются следы деревянной полки из массивных гладких досок толщиной 5,0 см (рисунки 3: 9; 6: 4). Перемычка ниши также была из досок (утрачены) около 5 см толщиной. Стенки ниши оштукатурены. Над нишей найден дымоход 12,0 × 12,0 см, проложенный вдоль перекрытия, его датировка – первая половина XX в. В кладке и закладке найдены шамотные кирпичи «EXTRA» и с прямоугольным клеймом.

Сохранившаяся поперечная стена в северо-западном отсеке служит опорой для двух сводов различных конструкций, имеющихся в каморе в самом углу отсека. Южная часть стены сконструирована в виде замурованной арки, пята которой врезана в продольную стену здания. Между её закладкой на продольной стене сохранилась штукатурка с жёлто-белой покраской и поворотом на срубленную первоначальную стену XIX в. Арка была сложена после 1912 г., имеет невысокий проём с клинчатой перемычкой. На стыке двух частей стены был прорублен дымоход, в котором имелась чугунная выюшка, аналогичная той, что на втором этаже, но сохранилась намного хуже (см. рисунок 6: 1). Перед дымоходом найдена кладка основания под плиту 0,6 × 1,1 м. Со стороны каморы напротив дымохода имеется высокая ниша на стыке южной части стены с аркой. В месте примыкания стен прослежены кирпичные штробы и гнездо для устройства строительных лесов (см. рисунок 6: 1). Камора имеет двухчастный характер и следы многочисленных переделок. Существующий вход пробит в XX в. через угол здания. Южная часть перекрыта сводом шириной около 1,25 м на поперечной стене. Свод спроецирован в виде упомянутой замурованной арки. Вторая опора арки (и свода) представляла собой пробитую кладку стены, которая упирается в фасад постройки конца XVIII вв. (см. рисунки 3 и 6: 2).

Заключение. На основе проведенных исследований подвала и первого этажа «Отеля» можно сделать следующие выводы.

1. Первоначальный парадный вход в здание располагался в западной части юго-западного отсека, после пожара 1871 г. его парадная деревянная лестница была заменена гранитной, для чего были возведены две кирпичные стены, а концы ступеней и пята свода врублены в западную и продольную стены здания.

⁵ См. сноску 4.

2. Первоначальные печи здания выкладывались из терракотовых и белоэмалевых изразцов, иных археологических остатков не найдено. Печи обслуживали смежные помещения, для чего в продольных и поперечных стенах были устроены арочные проёмы и запечные ниши. О печах, построенных после пожара 1871 г., данных нет, кроме контуров на плане 1874 г.

3. На уровне первого этажа все отсеки здания разделяли несущие стены, ряд которых утратили при восстановлении дома после пожара 1871 г. Кроме основной лестницы, в доме устраивается чёрная лестница, располагавшаяся в западной части северо-центрального отсека с выходом во двор.

4. Перемычки оконных и дверных проёмов по северной фасадной стене размещались на 32,0 см ниже относительно окон южного фасада. Окна восточного фасада были пробиты позднее.

5. Исходя из характера проёмов, связующих южно-центральный и северо-центральный отсеки, расположенные в них помещения первоначально были связаны сквозной лучковой аркой, стены которой были побелены. По проекту 1874 г. дверь была устроена в центре стены, с чем связано устройство клинчатой перемычки.

6. По южной фасадной стене многочисленные растёски и перекладки откосов существующих окон предполагают возможное наличие в первоначальном варианте дверных проёмов или окон, доходящих до уровня пола, что говорит о парадном назначении помещения (ресторана?).

7. Найденные артефакты и конструкции в северо-западном и северо-центральных отсеках позволяют предполагать, что здесь располагались уборная, склады, чёрная лестница и кухня, которые сохраняли своё назначение до 1917 г. подвергаясь ремонтам и перестройкам (появление новых или перестройка старых плит и печей из белого эмалевого кафеля и шамотного огнеупорного кирпича).

8. Северо-восточный и юго-восточный отсеки, судя по артефактам, первоначально были отдельными кабинетами, связанными между собой двухстворчатыми дверями. Вероятно, именно там располагалось «Общество взаимного кредита» Баркана. Помещения с профильными карнизами под потолком и печами из белого эмалевого кафеля пострадали в пожаре в 1912 г. Во время реконструкции здания после пожара 1912 г. в процессе расширения площади ресторана отсеки соединили аркой.

9. До пожара 1912 г. северо-восточный отсек разделялся несущей кирпичной стеной с дымоходами, печами и плитой. Меньшая его часть служила сенями, где устроили кирпичный в «ёлку» пол. Оттуда велось обслуживание печи в большем помещении. Окно в северной стене было переделано в дверь во двор.

10. После 1912 г. восстанавливаемое здание становится частью «Гранд Отеля», соединяясь с ним на уровне второго этажа.

11. После 1917 г. на первом этаже размещаются столовая (или буфет), на кухне вырубается ниша, перед которой строится новая плита, их облицовка делается из кафеля от разобранных печей. С ней, возможно, связаны находки шамотных кирпичей с клеймами. Тогда же сносятся стена с дымоходами и печи в северо-восточном отсеке, ряд дверных проёмов переносятся, закладываются или пробиваются вновь. Тогда же, вероятно, устраивается лоток нового дренажа, в который позднее укладываются керамические трубы.

12. Данные перестройки сохранились до 70-х гг. XX в., когда каменная лестница и вся деревянная начинка здания были уничтожены и созданы бетонные перекрытия. Планировка стен с того времени сохранилась до 2019 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дэйніс І.П. Полацкая даўніна. – Мінск: Медисонт, 2007. – 328 с.
2. Соловьёв А.А. Натурные исследования второго этажа здания бывшего «Гранд Отеля» по проспекту Ф. Скорины, д. № 5 в г. Полоцке // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2022. – № 8. – С. 102–111.
3. Дулькина Т.И. Марки российского фарфора и фаянса. 1750–1960. – М.: Изд-во Ирины Касаткиной, 2003. – 420 с.
4. Троцкий И. Фарфор и фаянс: справ. для коллекционеров. Указатель марок. – Л.: Жизнь искусства, 1924. – 322 с.
5. Козлов А.В. Русские печи и печная керамика XVII–XIX веков. – Т. VI. – М: Анко, С-П.; Эксклюзив Стиль, 2016, – 224 с. (Камины и печи).
6. Салаўёў А.А. Гарадская прастора Полацка ў складзе Расійскай імперыі (канец XVIII – пачатак XX ст.): гістарычныя традыцыі і новыя рэаліі // Полацк у святле станаўлення гістарычных і нацыянальных форм беларускай дзяржаўнасці (IX–XX стст.) / Д.У. Дук [і інш.]. – Магілёў: МДУ імя А.А. Куляшова, 2019. – С. 77–96.

REFERENCES

1. Deinis, I.P. (2007). *Polatskaya daunina*. Minsk: Medisont. (In Belarus.).
2. Salauuev, A.A. (2022). *Naturnye issledovaniya vtorogo etazha zdaniya byvshego «Grand Otelya» po prospektu F. Skoriny, d. № 5 v g. Polotske* [Field studies of the second floor of the former Grand Hotel building, 5 F. Skorina avenue, Polotsk] *Vestn. Polotsk gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki* [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences], (8), 102–111. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Dul'kina, T.I. (2003). *Marki rossiiskogo farfora i fayansa. 1750–1960*. Moscow: Izd-vo Iriny Kasatkinoi. (In Russ.).
4. Trockii I. (1924). *Farfor i fayans: spravochnik dlya kollektysionerov. Ukazatel' marok*. Leningrad: Zhizn' iskusstva. (In Russ.).

5. Kozlov, A.V. (2016) *Russkie pechi i pechnaya keramika XVII–XIX vekov*. Vol. IV. Moscow: Akno; Saint Petersburg: Eksklyuziv Stil' (In Russ.).
6. Salaeu, A.A. (2019). *Garadskaya prastora Polatska u skladze Rasiiskai imperyi (kanets XVIII – pachatak XX st.): gistarychnyya tradytsyi i novyya realii*. In D.U. Duk [et al.] *Polatsk u svyatile stanaulennyya gistarychnykh i natsyanal'nykh form belaruskai dzyarzhavnastsi (IX–XX stst.)* (77–96). Magileu: MDU imya A.A. Kulyashova. (In Belarus.).

Поступила 11.10.2023

THE RESULTS OF THE RESEARCH OF THE UNDERGROUND FLOOR OF THE HOUSE 5 ON F. SKORYNA AVENUE

A.A. SOLOVIEV

(Polotsk National Historical and Cultural Museum-Reserve)

The article presents the results of the field studies of the ground floor in the eastern part of the former hotel complex "Grand Hotel" on the corner of Lenina Street and F. Skoryna Avenue. The clearing of the underground areas, filling of the vaults above the basements and the scoping work on the walls helped us to reveal a number of structures and archaeological artifacts from different times related to the architectural history of this building and the various institutions inside it. In particular, the artifacts related to the functioning of this building as one of the "Grand Hotel" complex buildings, which was located here before 1917 and now is being revived by a new owner, are of interest for the research.

Keywords: "Grand Hotel", field studies, urban architecture, pits, soundings, tile, tiles, reconstruction.

UDC 666.973.2:666.97.031

DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-69-74

SHOTCRETES AND MORTARS FOR 3D PRINTERS USING CHINESE INDUSTRIAL WASTE

A. YAGUBKIN¹⁾, M. GUONA²⁾, prof. H. WANG³⁾^(1), 2)Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,³⁾Nanjing Tech University)¹⁾ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4124-3634>,²⁾ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3970-0509>,³⁾ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7742-9583>

Currently, ordinary Portland cement is the main cementing material for shotcrete in tunnels in my country. Part of the use of single-doped silica fume or fly ash, however, there are few cementitious materials that use double-doped or multi-doped mineral admixtures. Due to the single composition of the cementitious material, poor gradation, and low quality, the concrete has poor compactness, insufficient viscosity, and large rebound. The use of "multiple" mineral admixtures can better solve the problem of high rebound rate of shotcrete in tunnels. Among them, mineral admixtures include mineral powder, fly ash, silica fume and limestone powder. The cementitious material in concrete can be single-mixed, double-mixed or multi-mixed with mineral admixtures. In this way, the heat of hydration when the concrete sets and hardens can be reduced, reduce the cracking of concrete, improve the compactness and viscosity of concrete and reduce the rebound rate of concrete.

The aim of research: the overall idea and technical measures to solve the high rebound rate of shotcrete or 3D printer mix and the high amount of cementitious materials using Chinese industrial waste.

Scientific novelty of research: optimal compositions using Chinese industrial waste for wet shotcrete, optimal compositions using Chinese industrial waste for 3D construction printers, basic properties of wet shotcrete composites with using Chinese industrial waste, basic properties of 3D construction printer composites with using Chinese industrial waste.

Keywords: wet, shotcrete, 3D construction printer mix, quality, control, composites, industrial waste, fly ash, organic aggregates.

Introduction. With the development of the third industrial revolution [1; 2], science and technology play an increasingly important role in the process of promoting the development of productive forces, accelerating the transformation of science and technology into direct productive forces. While promoting the interpenetration among various disciplines, scientific research is also constantly developing in a comprehensive direction. 3D printing technology, which integrates mathematics, information, machinery, materials and chemistry [3], as a new type of rapid prototyping technology, has become one of the important technical symbols in the third industrial revolution. The development of manufacturing industry plays an important role. With the increasing improvement of 3D printing technology, the technology has been involved in various fields such as medical [4], automobile [5], construction [6; 7], military industry [8], etc., and has shown its huge productivity and unlimited potential. The emergence of 3D printing technology in the construction industry has demonstrated its superiority in terms of labor, construction period, and resource utilization [9; 10], making rapid manufacturing and industrialized production of future buildings possible, and even mass customization of personalized products. Construction, which will inevitably lead to a technological innovation in the construction industry [11–13]. As a new building construction technology [14], 3D architectural printing has innovated the traditional construction methods. While showing its huge production potential, it also inevitably puts forward new requirements for building materials.

The aim of research: The overall idea and technical measures to solve the high rebound rate of shotcrete or 3D printer mix and the high amount of cementitious materials using Chinese industrial waste. To achieve the aim, the following objectives were solved: make an overview of the experience of the Chinese construction industry in wet shotcrete and 3D constructions printers, to select the optimal composition and determine the main properties of shotcrete and mix for 3D construction printer using Chinese industrial waste, give recommendations on optimizing the composites and mixes with aggregates from Chinese industrial waste.

Main part. The equipment used in the spraying test is the TK500 wet spraying machine produced by Chengdu Yanfeng Technology Co., Ltd. Each mix ratio cuts and processes 6 sets of split tensile test piece (1d, 3d, 7d, 28d, 56d, 90d compressive strength), 1 One set of tensile test pieces (28d strength), one set of flexural test pieces (28d strength) and one set of electric flux test pieces (56d) are used to test the mechanical properties of shotcrete.

The steps to make the test piece are: (1) preparation and weighing of raw materials; (2) equipment trial run; (3) spray large board and bracket installation; (4) prepare materials according to the mix ratio; (5) spray large plates layer by layer; (6) cutting and processing of test pieces.

The larger the maximum size of gravel, the greater the rebound rate, and it is also prone to blockage. Therefore, 5~10 mm more than the maximum size of gravel is used. The unit water consumption is under the condition of satisfying spray construction. should be as small as possible. For general sprayed concrete, the slump is preferably 14~16 cm. The water-cement ratio and unit cement volume should be specified in accordance. For medium-grade sprayed concrete, the unit cement volume is mostly about 450 kg/mm³, and the water-cement ratio is mostly about 0,40~0,50. The addition rate and usage amount of mineral admixtures shall be set at appropriate values according to the performance required by shotcrete. Mineral admixtures include: silica fume, fly ash, limestone powder, blast furnace slag powder and straw, etc.

The water-binder ratio is 0,40 and 0,42. The amount of gelling material is 450 kg/m³. Under the condition that the dosage of water reducing agent is 1%. Table 1 and figure 1 show the test results of concrete slump, expansion and compressive strength of different ages with different sand ratio formulas.

Table 1. – Compressive strength, slump and expansion of shotcrete with different sand ratios

Specimen №	water-binder ratio	Compressive strength (MPa)			Slump/mm	Expansion/mm
		3d	7d	28d		
A1	0,40	19,33	25,06	32,83	115	250
A2		19,76	27,51	35,44	120	265
A3		19,89	28,99	40,20	175	370
A4		22,27	35,52	41,69	185	410
A5		20,98	25,37	31,29	174	360
A6		18,43	21,98	29,07	165	355
B1	0,42	16,77	21,01	28,12	145	320
B2		17,28	22,92	29,57	155	340
B3		17,89	23,51	30,94	174	370
B4		20,94	27,72	34,71	198	425
B5		18,05	22,97	30,79	184	405
B6		15,41	17,96	25,75	155	345

From figure 1, *a*, it can be seen that when the sand rate is less than 0,46, the strength of each age of concrete increases continuously with the increase of the sand rate; when the sand rate is 0,46, the strength of each age reaches the maximum; when the sand rate is 0,50, the strength of concrete at each age reaches the minimum value. It can be seen from figure 1, *b* that when the water-binder ratio is 0,42, the strength changes of concrete at 3d, 7d, and 28d are basically the same as when the water-binder ratio is 0,40, when the sand ratio is 0,46, the strength reaches the maximum value.

Based on the above analysis, the test results show that when the water-binder ratio is 0,40, 0,42, and the sand rate is 0,46, the working performance of concrete and the compressive strength of each age are better than other sand rate conditions, so the optimal sand rate of wet shotcrete can be determined is 0,46.

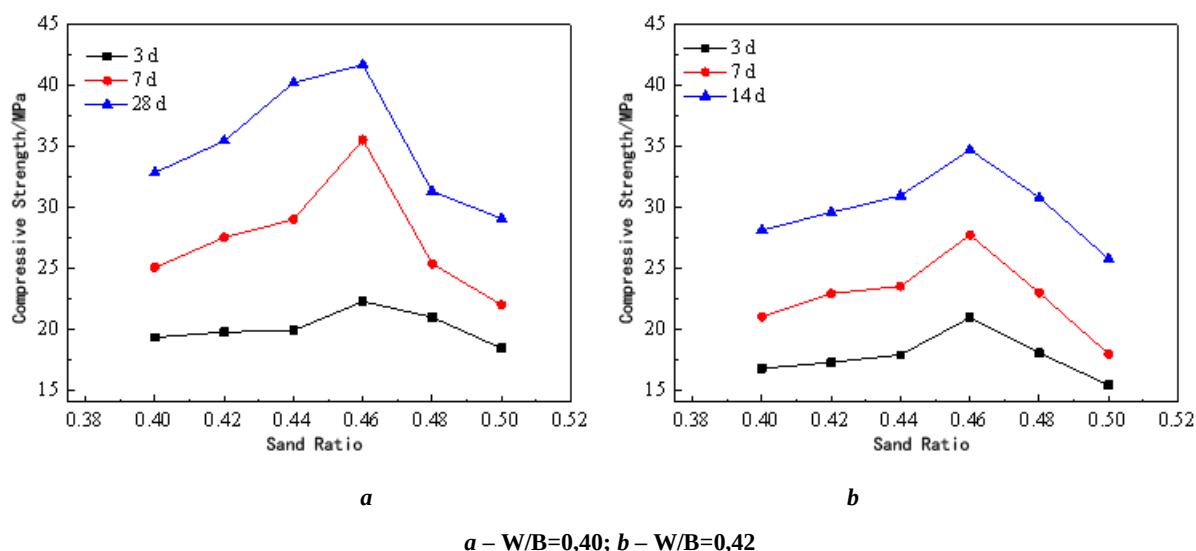


Figure 1. – Compressive strength of concrete at different ages with different sand ratios

It can be seen from figure 1 that the trend of concrete strength with the increase of sand ratio under the two conditions of water-binder ratio is basically the same, which shows that the influence of sand ratio on concrete strength basically shows a good regularity between 0,40 and 0,50. It is feasible to explore the optimal mix ratio of wet shotcrete by adjusting the sand rate. In order to fully consider the variability of raw materials on site and the strength factor of wet sprayed concrete, the actual concrete water-binder ratio is selected as 0,40.

The effect of the amount of cementitious material on the compressive strength of concrete. Under the conditions of sand rate 0,46 and water-binder ratio 0,40, the compressive strength of concrete at different ages with different amounts of cementitious materials is shown in table 2.

Table 2. – Compressive strength of concrete with different amount of cementitious material

Specimen №	Compressive strength (MPa)		
	3d	7d	28d
C1	22,27	35,52	41,69
C2	20,46	31,49	38,56
C3	16,03	22,92	28,39

It can be seen from table 2 that: when the sand ratio is 0,46 and the water-binder ratio is 0,40, the cementitious material dosage is 450 kg/m³, and the strength of concrete at each age is the highest. Based on the comprehensive consideration of strength and cost, the optimal dosage of cementitious material is finally determined to be 450 kg/m³, which not only ensures the strength of concrete, but also saves the amount of cementitious material and reduces the project cost.

The main characteristics of compositions for 3D printing with different straw fractions are shown in the table 3.

Table 3. – Compressive strength, density of compositions for 3D printing with different straw fractions

Specimen №	water-binder ratio	Compressive strength (MPa)			Density, (kg/m ³)	Note
		3d	7d	28d		
1	0,5	0,49	0,71	1,02	1138	Not suitable for load-bearing structures
2		0,77	1,07	1,53	1230	Not suitable for load-bearing structures
3		1,26	1,75	2,51	1195	Suitable for load-bearing structures

The prepared concrete must have an initial slump of about 200 mm, good workability, no segregation, and a 2 hour slump loss of less than 80 mm.

Through the slump test and adjusting the amount of water reducing agent to achieve the proper working performance of shotcrete, according to the test results of the aforementioned mix ratio scheme, the benchmark mix ratio is finally determined: the water-binder ratio is 0,40, the sand rate is 46%, and the water reducing agent is 0,8%. The amount of various materials is shown in table 4.

Table 4. – Amount of raw materials per cubic meter of concrete

Cementitious material (kg)	Mixed sand (kg)	Stone (kg)	Water (kg)	Superplasticizer (kg)	Density (kg/m ³)
450	791,2	928,8	180	4,0	2350

Conclusions and recommendations. Shotcrete or mix for 3D printer mainly sprays concrete mixed with a certain proportion of quick-setting agent on the rock surface with the help of a machine specially used for spraying with compressed air to strengthen the protection of the rock and realize the timely stress of the supporting structure. In the process of shotcrete construction, concrete pouring and vibration can be effectively combined into one process, reducing construction procedures and requiring no formwork. Therefore, this material is more suitable for narrow sites and projects that need to be stressed in time.

At present, concrete spraying methods are mainly divided into dry spraying and wet spraying. Traditional shotcrete mostly adopts dry spraying method, while wet spraying is better than dry spraying in terms of construction speed, construction quality and environmental protection. Therefore, wet spraying has gradually attracted more and more attention in these years. It has been applied and promoted in engineering.

In terms of construction speed, the spraying capacity of dry spraying process and dry spraying machinery and equipment is about 3 m³/h, while that of wet spraying process and wet spraying machinery and equipment is 20 m³/h. Therefore, the efficiency of wet spraying operation is significantly higher than that of dry spraying operation in the same time.

In terms of work efficiency, the overall construction speed of wet spraying is faster, especially in the construction of some ultra-long tunnels that require rapid excavation construction, and then it is necessary to spray concrete more quickly to strengthen the stability of the support as soon as possible, to prevent the occurrence of collapse accidents. Therefore, it is necessary to combine the wet spraying unit for concrete spraying, and the more efficient concrete spraying can greatly shorten the construction period and improve the safety of the operation.

In terms of construction quality, wet spraying is adopted. Since the concrete is produced in the mixing station, the mix ratio is stable, the overall compactness of the concrete is significantly higher than that of dry spraying, and the spraying quality is better.

In terms of construction environmental protection, the dust produced by the wet spray method is smaller, the spray rebound is less, and the physical impact on the workers will be lower. However, if the dry spray method is used, a large amount of dust will be generated during construction. Dust has greatly increased the pollution of the construction environment.

Technical measures to control the rebound rate of wet shotcrete:

1. Strictly control the quality of cement. When choosing cement materials, it is necessary to choose cement materials with less shrinkage as much as possible. The strength growth rate of materials with less shrinkage will be faster, and they can better react with the accelerator, effectively ensuring that the cement can be quickly sprayed after spraying. It reacts with the surface of the material to ensure the setting speed of the concrete and effectively reduce the amount of rebound.

2. Strictly control the quality of aggregate. When selecting sand, medium-coarse sand should be the main one, and the fineness modulus should be controlled between 2,8 and 3,2. Secondly, the mud content should be kept within 2,5%, and the moisture content should be controlled within 6%. The main reason for choosing coarse sand instead of fine sand is that too fine sand particle size will lead to an increase in the amount of cementitious materials and increase the shrinkage of concrete, resulting in excessive dust during construction, which will have a greater impact on the normal construction of workers. Large impact, and sand with too small particle size is not conducive to mixing with gravel, resulting in increased rebound. In the actual construction of sprayed concrete, it is necessary to select crushed stones with an appropriate particle size. Wear and tear of large machinery. However, if the particle size of the gravel is too small, it will affect the quality of shotcrete because of its insufficient structural strength. In actual construction, the sand and gravel in the mixing station will contain some moisture, and the distribution will be uneven. The moisture content test is accurate to ensure the stability of concrete workability.

3. Strictly control the quality of admixtures. During construction, accelerators with faster setting speed should be selected. Reduces rebound through faster setting. To prevent the condensation speed from being fast enough during actual construction, caused to fall off under the influence of gravity, moreover, when the condensation speed is fast enough, it can also ensure the timeliness and safety of construction.

4. Strictly control the mixing ratio. In the process of concrete spraying construction, in addition to strict screening of the quality of materials, the mix ratio between materials should also be strictly controlled.

5. Strictly control the construction process. Jet air pressure control. When spraying concrete, the length of the conveying pipe should be controlled within 15 m, and the wind pressure should be controlled at about 0,4 MPa. The wind pressure should be higher when spraying the vault, and the wind pressure should be lower when spraying the side wall. Reasonable control of the spraying distance and wind pressure can effectively control the rebound rate. Considering that the use of air ducts may cause waste of wind power, it is necessary to control the air source pressure in combination with the length of the tunnel and the sealing characteristics of the air ducts. In the actual construction process, the operators should strictly check the sealing performance of the mechanical air duct. If the sealing performance is high, the wind pressure can be appropriately reduced and controlled at around 0,3 MPa, so as to effectively control the site. The amount of dust during actual construction should be controlled reasonably to rebound rate during concrete spraying.

6. Spray angle control. When spraying concrete, the condition of the sprayed structural surface should be checked first. If the sprayed structural surface itself is relatively flat, the nozzle should be controlled to be perpendicular to the structural surface during construction to prevent the problem of excessive rebound rate. If spraying is carried out in some relatively narrow places, the nozzle angle is controlled at about 70°, so that when the concrete is sprayed from the nozzle, it just falls on the top of the thicker concrete.

7. Spray distance control. In the process of spraying concrete, the grasp of the distance will greatly affect the rebound rate. When using the wet spraying method, the distance can be farther away, but if the distance is too long, the compaction degree will be insufficient and the strength will be weakened; if the distance is too small, the concrete will

fall off quickly due to the influence of wind pressure. The problem. For this reason, when spraying concrete, the distance between the nozzle and the sprayed structural surface should be kept within 1 m to ensure a reasonable spraying distance [15].

8. Layered spray thickness control. In the process of spraying concrete, in order to prevent too much concrete attached to the structural surface due to excessive spraying of concrete, it will fall off and fall off under the influence of gravity. In the construction process, the layered spraying method can be selected, and the thickness can be reasonably controlled by spraying step by step, and the thickness of each layer should be reasonably controlled.

9. Spray interval time control. Since the spraying of concrete is not one-time, in actual operation, the operator needs to control the interval between each spraying. For example, after the first spraying, it is necessary to wait for a period of time to prevent the concrete from falling off due to the impact of wind pressure due to spraying again before the initial setting, resulting in an increase in the overall rebound rate. However, if the interval is too long, the new concrete cannot be well combined with the previous concrete because the previous concrete has already set, which increases the rebound rate of the concrete. Therefore, in the interval of spraying, it is necessary to ensure that the last sprayed concrete reaches the initial setting before spraying the next layer of concrete.

10. Improvement of steel mesh. The traditional lining of tunnels adopts reinforced mesh, which has a thick skeleton, high rigidity, and relatively large mesh size, which has little effect on reducing the rebound of shotcrete. In addition, the opening mesh is used, and it is difficult to connect each other during laying, which affects laying quality. In order to solve many problems of steel mesh, polyethylene polymer mesh can be used in shotcrete, as shown in figure 1, to replace the steel mesh in the traditional process, to make up for the limited performance of the steel mesh in the initial support of the tunnel, and the concrete in order to solve problems such as large rebound, the mesh is made of polyethylene polymer material, which makes it easy for workers to install through simple connections.

The general conclusions based on the results of the work are as follows:

1. Was made an overview of the experience of the Chinese construction industry in wet shotcrete and 3D constructions printers, including the experience of the Chinese construction industry in the implementation of the wet shotcrete, the experience of the Chinese construction industry in the implementation of the 3D constructions printers and the use of Chinese industrial waste in construction.

2. Were suggested methods for obtaining optimal compositions for wet shotcrete and mortars for 3D construction printers using Chinese industrial waste. Based on the proposed methods were substantiated optimal compositions using Chinese industrial waste for wet shotcrete and mortars for 3D construction printers.

3. Basic properties of wet shotcrete composites with using Chinese industrial waste have been researched. Basic properties of 3D construction printer composites with using Chinese industrial waste have been researched.

4. The results obtained are of great practical importance both for China and for the Republic of Belarus. Were given recommendations on optimizing the composites and mixes with aggregates from Chinese industrial waste.

REFERENCES

1. Li, Xiaoli, Ma, Jianxiong & Li, Ping. (2014). 3D Printing Technology and Application Trend. *Automatic Instrumentation*, 35(1), 1–5.
2. Deng, Manqiu. (2014). The development prospect of the third industrial revolution 3D printing in China. *Digital Printing*, (2), 22–23.
3. Ding, Lieyun, Jie, Xu & Yawei, Qin. (2015). A review of research and application of architectural 3D printing digital construction technology. *Journal of Civil Engineering and Management*, 32(3), 1–10.
4. Huang, Weidong, Lu, Xiaowei & Lin, Xin. (2011). Preparation of biomedical materials by laser forming Research status and development trend. *China Materials Progress*, (4), 1–10.
5. Liu, Guanchen. (2016). Analysis on the prospect of 3D printing technology in the future automobile industry. *Times Automobile*, (3), 33.
6. Wang, Qing. (2016). Application of 3D printing technology in construction engineering. *Architectural Science*, (34), 260.
7. Jiang, Lixin, Xiangxiang, Yi & Jie, Shao. (2013). The development of 3D printing technology and its application in the field of military industry. *Chinese Army to Civilian*, (12), 58–62.
8. Yang, Jianjiang & Xiang, Chen. (2015). 3D printing architectural technology and application trends. *Construction Technology*, 44(10), 84–88.
9. Zhang, Hao & Yuchen, An. (2016). The application and prospect of 3D printing technology in the field of construction engineering. *Shanxi Architecture*, 42(11), 17–18.
10. Zhang, Xiaoguang. (2014). Research on the development of architectural technology based on 3D printing era. *Henan Science and Technology*, (20), 162–163.
11. Hong, Yue. (2014). 3D printing architecture from theory to practice. *Green Building Materials*, (6), 58–62.
12. Yang, Jianjiang & Xiang, Chen. (2015). 3D printing architectural technology and application trends. *Construction Technology*, 44(10), 84–88.
13. Wang, Wentao. (2014). The development trend of 3D printing manufacturing technology and its impact on my country's structural transformation. *Science and Technology Management Research*, (6), 22–25.
14. Wang, Cancai. (2012). Analysis of the development status of 3D printing. *Digital Technology*, (9), 38–39.
15. Chen, Lixin. (2020). Improvement measures for pipe plugging and high rebound rate in tunnel wet spraying manipulator construction. *Anhui Architecture*, 27(12), 172.

Поступила 21.11.2023

ТОРКРЕТ-БЕТОНЫ И РАСТВОРЫ ДЛЯ 3D ПРИНТЕРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КИТАЯ

А. ЯГУБКИН¹⁾, М. ГУОНА²⁾, проф. Х. ВАНГ³⁾

(^{1), 2)}Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,

³⁾Нанкинский технологический университет)

В настоящее время основным цементирующим материалом для торкрет-бетона в тоннелях является обычный портландцемент. Частично используется кварцевый песок или зола-унос, однако мало цементных материалов, в которых используются двухдобавочные или многодобавочные минеральные добавки. Из-за односоставности цементного материала, плохой градации и низкого качества бетон имеет плохую уплотняемость, недостаточную вязкость и большой отскок. Использование «многокомпонентных» минеральных добавок позволяет лучше решить проблему высокой скорости отскока торкрет-бетона в тоннелях. К минеральным добавкам относятся минеральный порошок, зола-унос, кремнеземный дым и известняковый порошок. Цементный материал в бетоне может быть однокомпонентным, двухкомпонентным или многокомпонентным с минеральными добавками. Это позволяет снизить теплоту гидратации при схватывании и твердении бетона, уменьшить растрескивание бетона, повысить компактность и вязкость бетона, уменьшить скорость отскока бетона.

Цель исследования: разработка общей идеи и технических мер по решению проблемы высокой скорости отскока торкрет-бетона или смеси для 3D принтера и большого количества цементирующих материалов с использованием отходов китайской промышленности.

Научная новизна исследования: оптимальные составы с использованием отходов китайской промышленности для мокрого торкретирования, оптимальные составы с использованием отходов китайской промышленности для 3D строительных принтеров, основные свойства композитов для мокрого торкретирования с использованием отходов китайской промышленности, основные свойства композитов для 3D строительных принтеров с использованием отходов китайской промышленности.

Ключевые слова: *мокрый, торкретирование, смесь для 3D строительного принтера, качество, контроль, композиты, промышленные отходы, зола-унос, органические заполнители.*

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.236

DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-75-80

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ
СИСТЕМ КООРДИНАТ НА ПЛОСКОСТИ

А.С. ИВАШНЁВА,
канд. техн. наук К.И. МАРКОВИЧ,
П.Ф. ПАРАДНЯ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Для трансформирования систем координат на плоскости в зависимости от состава элементов трансформирования выделяют ортогональную, подобную и аффинную модели. В статье проведен анализ существующих подходов идентификации моделей трансформирования. Предложен подход для идентификации модели трансформирования систем координат на плоскости, основанный на геометрических свойствах, не меняющихся при определенном виде преобразований. На основе предложенного подхода составлена процедура в программном продукте Matlab, ускоряющая процесс вычисления всех необходимых соотношений для анализа и последующего определения вида модели трансформирования систем координат на плоскости.

Ключевые слова: идентификация моделей трансформирования, аффинная модель, ортогональная модель, подобная модель, элементы трансформирования.

Введение. В зависимости от того, какими элементами представлено трансформирование систем координат на плоскости, выделяют следующие модели: ортогональная модель (или трёхпараметрическая), подобная модель (или четырёхпараметрическая), аффинная модель (или шестипараметрическая) [1; 2].

Если в процессе трансформирования систем координат существует необходимость на основе полученных коэффициентов вычислить элементы трансформирования, например, угол вращения, коэффициенты масштабирования и др., то для этого нужно иметь представление о виде модели трансформирования (например, при анализе деформаций геодезической сети).

Основная часть. Задачу идентификации модели возможно решить несколькими способами. Отметим, что обычно такого рода задача решается весьма тяжело, на основе расчета и сравнения для всех возможных моделей трансформирования их целевой функции (формула 1) или стандартного отклонения модели (формула 2).

$$\Phi = v^T P v; \quad (1)$$

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{v^T P v}{2n - k}}, \quad (2)$$

где v – поправки в координаты в новой системе координат;
 n – количество общих точек;
 k – число оцениваемых коэффициентов.

У какой модели величина целевой функции или стандартного отклонения окажутся меньше, та модель наилучшим образом отражает выполненное трансформирование.

Существуют и некоторые другие методы, например, на основе вычисления информационной характеристики Akaike (AIC) (формула 3)¹

$$AIC = n \cdot \log(WSSR) + 2k, \quad (3)$$

где n – количество наблюдений;
 $WSSR$ – взвешенная сумма квадратов невязок;
 k – количество параметров.

Первый член в правой части уравнения (3) является мерой несоответствия модели, тогда как второй член ($2k$) можно интерпретировать как «штраф» за увеличение количества параметров в модели. Таким образом, хорошей математической моделью является та, которая имеет наименьшую величину информационной характеристики Akaike. Но стоит отметить, что данный алгоритм также предполагает расчет по всем моделям и выявлению оптимальной модели путем сравнения вычисленных характеристик.

¹ Felus Y.A., Felus M. On Choosing the Right Coordinate Transformation Method // Surveyors Key Role in Accelerated Development: FIG-Working Week 2009 / Eilat, Israel (3–8 May 2009). – P. 1–10.

Другой подход для идентификации модели трансформирования основан на наиболее общем из линейных, аффинном трансформировании, с использованием элементов статистического тестирования [3].

Предполагая наличие общих точек для трансформирования без ошибок и используя аффинную модель трансформирования для случая, когда она является подобной, будут получены такие же результаты, как если бы использовалась подобная модель: равные друг другу не единичные масштабные коэффициенты и нарушение ортогональности равно нулю. Если наоборот, имеется аффинная модель трансформирования, а используются формулы подобного трансформирования, то величина неортогональности и различные масштабы распределяются в угол поворота и масштаб, а это может привести к достаточно большим погрешностям. Так как задача трансформирования систем координат решается в условиях переопределенности и ошибок координат, то значения параметров трансформирования получают искажения, в результате чего их значения будут отличными от нуля и единицы.

Для идентификации модели трансформирования возможно использовать элементы статистического тестирования. Используя степень отклонения по вероятности исследуемого параметра от нуля или единицы (или от другого какого-либо значения), можно делать вывод о том, что некоторые элементы трансформирования статистически не отличаются от нуля или единицы (или статистически неразличимы между собой). По полученным результатам возможно идентифицировать вид модели трансформирования, наиболее близкой к реальной [3].

Для решения задачи идентификации модели трансформирования можно использовать подход, основанный на геометрических свойствах, не меняющихся при определенном виде преобразований (ортогональное, подобное, аффинное) [1].

Рассматривая каждую модель, можно выделить ряд геометрических свойств, не меняющихся при ортогональных, подобных и аффинных преобразованиях, другими словами, с помощью условий ортогональности, подобия, аффинности фигур можно определить модель преобразования аналитическим способом.

Известно, что в случае ортогональной модели, мы имеем дело с группой ортогональных преобразований [1; 4]. При ортогональных преобразованиях сохраняются размер и форма фигуры, а также длины отрезков и углы между ними (линейный масштаб равен 1).

Если отказаться от требований сохранения размеров фигуры и рассматривать лишь такие преобразования, при которых остается неизменной ее форма, то мы имеем группу подобных преобразований (четырепараметрическую модель). Эти преобразования, не изменяя формы фигуры, увеличивают или уменьшают все размеры в одно и то же число раз (линейный масштаб постоянный). При преобразованиях подобия длины отрезков изменяются, но углы между ними сохраняются.

Аффинные преобразования – группа более общих преобразований, которые, сохраняя прямые линии и параллельность, меняют длины отрезков, величины углов и площадей фигур. Сохраняются отношения длин отрезков, лежащих на одной прямой (или на параллельных прямых), и отношение площадей фигур [1].

Знание свойств, не меняющихся при преобразованиях той или иной группы, позволяет определить модель преобразования. Для численного определения модели линейного преобразования можно рекомендовать следующий порядок вычисления.

Для примера представим схему из четырех общих точек, координаты которых имеются в двух системах координат (рисунок 1).

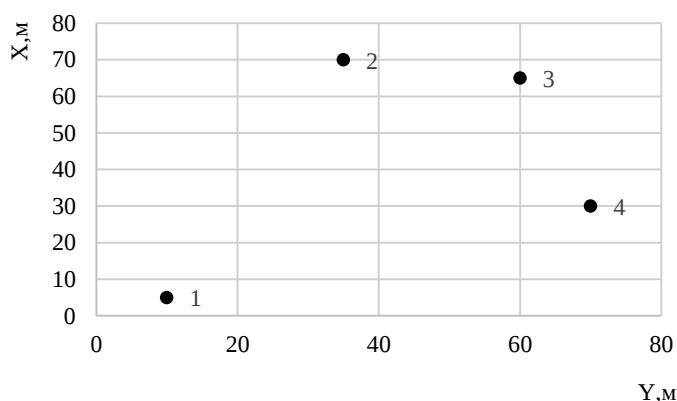


Рисунок 1. – Схема расположения общих точек

Линейный масштаб по всем линиям, исходящим из точки 1, вычисляется по формуле

$$m = \frac{S'_{1i}}{S_{1i}}. \quad (4)$$

При значении линейного масштаба $m=1$ преобразование может быть ортогональным. Если линейный масштаб будет постоянным, то преобразование может быть подобным. Дело в том, что это условие является необходимым, но не является достаточным, так как выбранные линии могут располагаться вдоль осей координат, а в частных случаях аффинных преобразований масштабы вдоль осей координат равны между собой (на плоскости квадрат преобразуется в ромб). Для окончательного заключения о том, что модель преобразования подобная, необходимо выполнить сравнение углов, стороны которых исходят из вершины 1, вычисляя их косинусы по формуле (приложение скалярного произведения векторов) [5]

$$\cos \beta_{i1k} = \frac{(x_i - x_1)(x_k - x_1) + (y_i - y_1)(y_k - y_1)}{\sqrt{\Delta x_{1i}^2 + \Delta y_{1i}^2} \sqrt{\Delta x_{1k}^2 + \Delta y_{1k}^2}}. \quad (5)$$

Если углы равны $\beta_{i1k} = \beta'_{i1k}$, масштаб постоянен и равен единице $m = 1$, то преобразование ортогональное (модель ортогональная).

Если углы равны $\beta_{i1k} = \beta'_{i1k}$, масштаб постоянен $m = \text{const}$, то преобразование подобное (модель подобная).

Если углы не равны $\beta_{i1k} \neq \beta'_{i1k}$, и $m \neq \text{const}$, то возможна шестипараметрическая модель.

На плоскости условию аффинности соответствует требование постоянства масштаба площадей. Необходимо выполнить проверку путем вычисления отношения площадей фигур

$$m'_s = \frac{S'_{123}}{S_{123}}; \quad (6)$$

$$m''_s = \frac{S'_{134}}{S_{134}}. \quad (7)$$

Площадь треугольников можно найти по формуле (половина модуля векторного произведения векторов, на которых построен треугольник) [5]

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} |\overline{AB} \times \overline{AC}|, \quad (8)$$

где $\overline{AB}$ и $\overline{AC}$ – вектора, $|\overline{AB} \times \overline{AC}|$ – модуль векторного произведения векторов.

Если $m'_s = m''_s$, то делается заключение, что преобразование аффинное (модель аффинная).

Если $m'_s \neq m''_s$, то преобразование проективное или более сложное, например, нелинейное.

На рисунке 2 представлена блок-схема для численного определения модели преобразования координат на плоскости. Началом схемы является блок «Вычисление линейных масштабов».

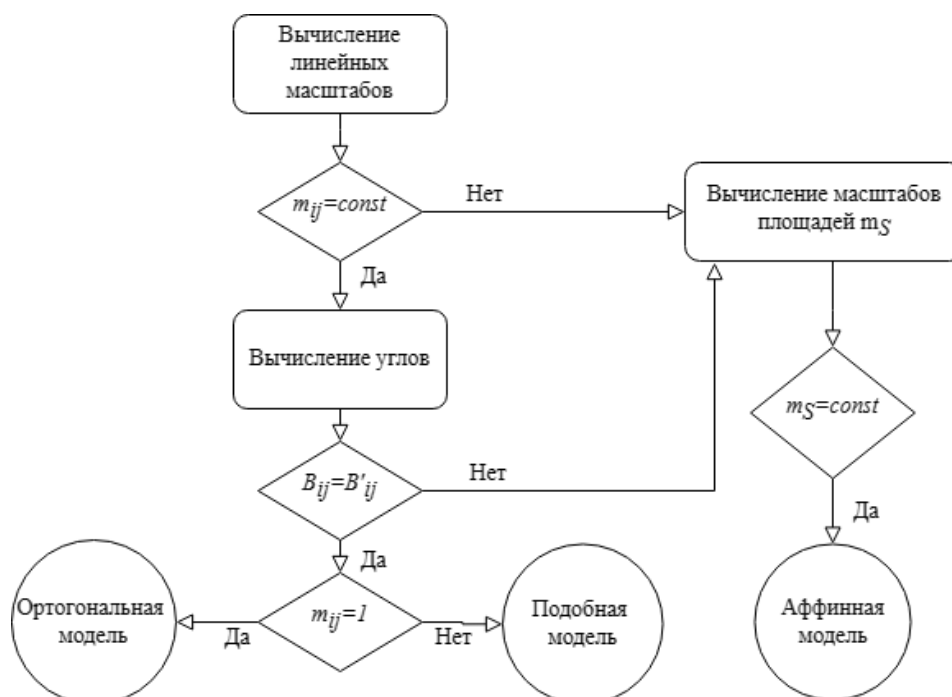


Рисунок 2. – Блок-схема для численного определения модели преобразования на плоскости

По данной блок-схеме составлена процедура *model.m*. в программном продукте *Matlab*, ускоряющая процесс вычисления всех необходимых соотношений для анализа и последующего определения вида модели (рисунок 3).

Входными данными для процедуры являются:

ks – координаты общих точек в новой системе координат;

kn – координаты общих точек в старой системе координат;

n – количество общих точек.

Выходными данными для процедуры являются:

m – отношение длин линий между точками в новой и старой системах координат;

mb – отношение углов в новой и старой системах координат;

ms – отношение площадей треугольников, образуемых между первой и другими точками, в новой и старой системах координат. Каждая точка должна быть включена в треугольник хотя бы раз.

```

1  function [m,mb,ms] = model(ks,kn)
2  %Input:
3  %   ks       : coordinate (old system)
4  %   kn       : coordinate (new system)
5  %   N        : number of points
6  % Output:
7  %   m        : ratio of lengths
8  %   mb       : ratio of angles
9  %   ms       : ratio of areas
10 N=input('number of points -4; number of points -5; number of points -6; ');
11 if N==4
12 %distances
13 S12=sqrt((ks(2,1)-ks(1,1))^2+(ks(2,2)-ks(1,2))^2);
14 S13=sqrt((ks(3,1)-ks(1,1))^2+(ks(3,2)-ks(1,2))^2);
15 S14=sqrt((ks(4,1)-ks(1,1))^2+(ks(4,2)-ks(1,2))^2);
16 S12n=sqrt((kn(2,1)-kn(1,1))^2+(kn(2,2)-kn(1,2))^2);

```

Рисунок 3. – Фрагмент процедуры *model.m*. в программном продукте *Matlab*

Если предполагать, что координаты общих точек не содержат ошибки, то будут получены следующие выходные данные для моделей. Для ортогональной модели – таблица 1, для подобной модели – таблица 2, для аффинной модели – таблица 3.

Таблица 1. – Выходные данные для ортогональной модели

m	1	1	1	1
mb	1	1	1	1
ms	1	1	1	1

Таблица 2. – Выходные данные для подобной модели

m	2	2	2	2
mb	1	1	1	1
ms	4	4	4	4

Таблица 3. – Выходные данные для аффинной модели

m	1,207332	1,234929	1,215577	1,243732
mb	1,005895	1,001875	1,003131	1,001011
ms	1,559762	1,559762	1,559762	1,559762

По полученным результатам легко определить модель, руководствуясь блок-схемой, представленной на рисунке 2. Проанализируем данные таблицы 1: отношение длин линий между точками в новой и старой системах координат постоянно и равно единице; отношение углов равно единице, что говорит об попарном равенстве углов. Это позволяет сделать вывод, что преобразование является ортогональным (модель ортогональная). Проанализируем данные таблицы 2: отношение длин линий между точками в новой и старой системах координат постоянно и не равно единице; отношение углов равно единице, что говорит об попарном равенстве углов. Это позволяет сделать вывод, что преобразование является подобным (модель подобная). Проанализируем данные таблицы 3: отношение длин линий между точками в новой и старой системах координат не постоянно; условие равенства углов не выполняется; отношение площадей треугольников постоянно, значит требование постоянства масштаба площадей выполняется. Это позволяет сделать вывод, что преобразование является аффинным (модель аффинная).

Процедура может быть усовершенствована, если добавить оператор «if», и на основе выполнения или невыполнения вышеперечисленных условий выходными данными могут быть названия моделей (например, «ортогональная модель»).

В силу того, что координаты точек в двух системах в реальных условиях имеют ошибки, то идеальных равенств получить невозможно. Приведен фрагмент вычислительного эксперимента (таблица 4). В ортогональную модель заложены угол поворота 3° , сдвиги 100 м и 200 м по оси X и оси Y соответственно, в координаты общих точек внесены ошибки.

Таблица 4. – Выходные данные для ортогональной модели

m	1,000039	1,000061	0,999975	1,000017
mb	1,000012	0,999980	0,999993	1,000002
ms	1,000199	0,999615	1,001026	0,999827

Ошибки в координатах привели к тому, что в таблице 4 нет идеальных равенств. Были проведены дополнительные исследования, чтобы понимать в каком знаке после запятой после округления считать изменения в цифрах результатом несоблюдения равенств, а не влиянием ошибок.

Вычислительный эксперимент проводился на основе различных моделей трансформирования, в координаты общих точек закладывались ошибки в диапазоне 2–20 мм. Эксперимент был проведен многократно. По его результатам можно заключить, что ошибки порядка 2–20 мм могут изменять знак для отношения длин вплоть до четвертого после запятой, для отношения углов – четвертый после запятой, для соотношения площадей – второй после запятой. То есть изменение знаков на данных местах может говорить не о несоблюдении равенств, а о влиянии ошибок данного порядка. Если изменяются знаки до выделенных знаков, то можно говорить о неравенстве соотношений.

Также для дополнения данного способа идентификации модели трансформирования возможно использовать элементы статистического тестирования, а именно, степень отклонения по вероятности P исследуемого отношения от единицы или от другого значения b , и далее возможность заключать, что некоторые соотношения статистически неразличимы между собой или статистически не отличаются от единицы. Для сохранения простоты и скорости предложенного способа идентификации модели трансформирования статистическое тестирование не использовалось.

Заключение. Для идентификации модели трансформирования систем координат на плоскости возможно использовать несколько способов, а именно: на основе расчета и сравнения для всех возможных моделей трансформирования их целевой функции или стандартного отклонения модели; на основе вычисления информационной характеристики *Akaike* (*AIC*); на основе наиболее общего из линейных, аффинного трансформирования, с использованием элементов статистического тестирования. В статье предлагается подход к определению вида модели трансформирования на плоскости, основанный на геометрических свойствах, не меняющихся при определенном виде преобразований. Проведены дополнительные экспериментальные исследования, связанные с тем фактом, что координаты общих точек содержат ошибки, что не позволяет получать идеальные равенства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моденов П.С. Геометрические преобразования. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1961. – 234 с.
2. Ghilani Ch.D., Wolf P.R. Adjustment computations: spatial data analysis, Fourth Edition. – Hoboken: JOHN WILEY & SONS, INC., 2006. – 632 с.
3. Дегтярев А.М., Ялтыхов В.В. Идентификация модели трансформации в геодезии на основе аффинного преобразования // Автоматизир. технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 2(49). – С. 71–74.
4. Буткевич А.В. Определение вида линейного трансформирования пространственных прямоугольных координат // Геодезия и картография. – 1978. – № 4. – С. 35–37.
5. Гусак А.А. Высшая математика: в 2 т. – Минск: ТетраСистемс, 2007. – Т. 1. – 544 с.

REFERENCES

1. Modenov, P.S. (1961). *Geometricheskie preobrazovaniya*. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta. (In Russ.).
2. Ghilani, Ch.D. & Wolf, P.R. (2006). *Adjustment computations: spatial data analysis, Fourth Edition*. Hoboken: JOHN WILEY & SONS, INC.
3. Degtyarev, A.M. & Yaltykhov, V.V. (2013). Identifikatsiya modeli transformatsii v geodezii na osnove affinnogo preobrazovaniya [Identification of the transformation model in geodesy based on affine transformation]. *Avtomatizirovannye tekhnologii izyskaniy i proektirovaniya [Automated survey and design technologies]*, 2(49), 71–74. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Butkevich, A.V. (1978). Opredelenie vida lineinogo transformirovaniya prostranstvennykh pryamougol'nykh koordinat [Determining the type of linear transformation of spatial rectangular coordinates]. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]*, (4), 35–37. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Gusak, A.A. (2007). *Vyshshaya matematika: v 2 t.* T. 1. Minsk: TetraSistems. (In Russ.).

Поступила 21.11.2023

**IDENTIFICATION OF TRANSFORMATION MODELS
OF COORDINATE SYSTEMS ON THE PLANE****A. IVASHNIOVA, K. MARKOVICH, P. PARADNIA**
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

To transform coordinate systems on a plane, depending on the composition of the transformation elements, orthogonal, similar and affine models are distinguished. The article analyzes existing approaches to identifying transformation models. An approach is proposed for identifying a model for transforming coordinate systems on a plane, based on geometric properties that do not change under a certain type of transformation. Based on the proposed approach, a procedure has been compiled in the software product Matlab, accelerating the process of calculating all the necessary relationships for analysis and subsequent determination of the type of model for transforming coordinate systems on a plane.

Keywords: *identification of transformation models, affine model, orthogonal model, similar model, transformation elements.*

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 502.2

DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-81-87

ВЫБОР МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЯ РУБЕЖА ДЛЯ СБОРА НЕФТИ ПРИ ВОЗМОЖНОЙ АВАРИИ НА ПОДВОДНОМ ПЕРЕХОДЕ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

канд. техн. наук, доц. А.Г. КУЛЬБЕЙ, канд. экон. наук, доц. С.В. БОСЛОВЯК,
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ, канд. техн. наук К.И. МАРКОВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Статья посвящена обоснованию технических решений по выбору стационарного рубежа для сбора нефти для подводного перехода оператора магистральных нефтепроводов в Республике Беларусь. Для изучения ландшафтных условий территории, выбранной в качестве предполагаемого стационарного рубежа локализации и сбора нефти на реке, выполнена тахеометрическая съемка местности. Результатом геодезических и гидрометрических работ явился топографический план местности с нанесёнными линиями высот сечения рельефа, в том числе дна водоёма, и гидроизотох скоростей течения водотока. Выбранный рубеж обеспечивает оптимальные условия для локализации возможного разлива нефти.

Ключевые слова: топографическая съемка, гидрометрическая съемка, система координат.

Введение. При возникновении аварии на магистральном нефтепроводе возможно попадание нефти в русло реки, после чего происходит её распространение по течению. При этом могут быть загрязнены достаточно протяженные участки русла и поймы, что представляет огромную экологическую проблему. С целью ограничения распространения нефти устанавливают боновые рубежи её задержания. Однако, в силу гидрологических причин, места для установки бонов не всегда подбираются верно, из-за чего боны могут не реализовать свою функцию по локализации нефтяного загрязнения.

Также необходимо учесть, что аварийно-восстановительная служба оператора магистрального нефтепровода (далее – АВС), которая будет устанавливать боновые заграждения, находится на значительном удалении как от места аварии, так и от того места, до которого успеет распространиться пятно нефти за время сбора АВС, её движения и разворачивания. При возникновении подобных аварий счёт идёт на минуты и нет возможности тратить время на поиск мест установки боновых заграждений.

Учитывая всё вышеизложенное, места для установки боновых заграждений, называемых рубежами для сбора нефти, необходимо определять заранее.

Основная часть. Исследование проведено по заказу организации-оператора магистральных нефтепроводов на территории Республики Беларусь для подводного перехода (далее – ПП) магистрального нефтепровода «Унеча-Полоцк» через реку Сож.

Для достижения поставленной цели необходимо последовательно выполнить следующие этапы:

- 1) расчёт минимальной зоны загрязнения;
- 2) картографический поиск;
- 3) рекогносцировка на местности и определение наилучшего рубежа;
- 4) топографическая и гидрометрическая съёмка;
- 5) анализ полученных данных.

Этап 1. Расчёт минимальной зоны загрязнения

Задача расчёта минимальной зоны загрязнения реки Сож при возможной аварии на ПП сводится к расчёту времени движения возможного нефтяного пятна по реке Сож и расчёту времени прибытия аварийно-восстановительной службы (АВС) для проведения мероприятий локализации нефтяного загрязнения с целью выявления минимального расстояния по руслу реки до точки их встречи.

Согласно СТП 09100.20001.003¹, для решения этой задачи нами была оценена скорость движения пятна нефти по наихудшим условиям. Также для расчёта времени прибытия АВС учитывалось время сбора АВС, время её движения и время разворачивания мероприятий по ликвидации нефтяного разлива, что позволило нам определить минимальную точку готовности АВС к приёму нефти.

Определим расстояние S , которое может пройти пятно нефти после попадания в реку при максимальной скорости течения потока:

$$S = 3,6 \cdot v_{\max} \cdot T_{\text{н.п.}}, \quad (1)$$

где S – расстояние от места попадания нефти в реку до стационарного рубежа, км;

$v_{\max}$ – максимальная скорость течения на свободной поверхности воды, при паводке 1,5 м/с [1];

$T_{\text{н.п.}}$ – время движения нефтяного пятна, час. Время движения пятна нефти $T_{\text{н.п.}}$ согласно СТП 09100.20001.003 задается от 1 до 5 часов.

¹ СТП 09100.20001.003-2014. Стационарные рубежи локализации и сбора нефти на реках. Правила размещения, обустройства и эксплуатации.

Для расчёта минимальной зоны загрязнения построим график движения пятна нефти (рисунок 1).

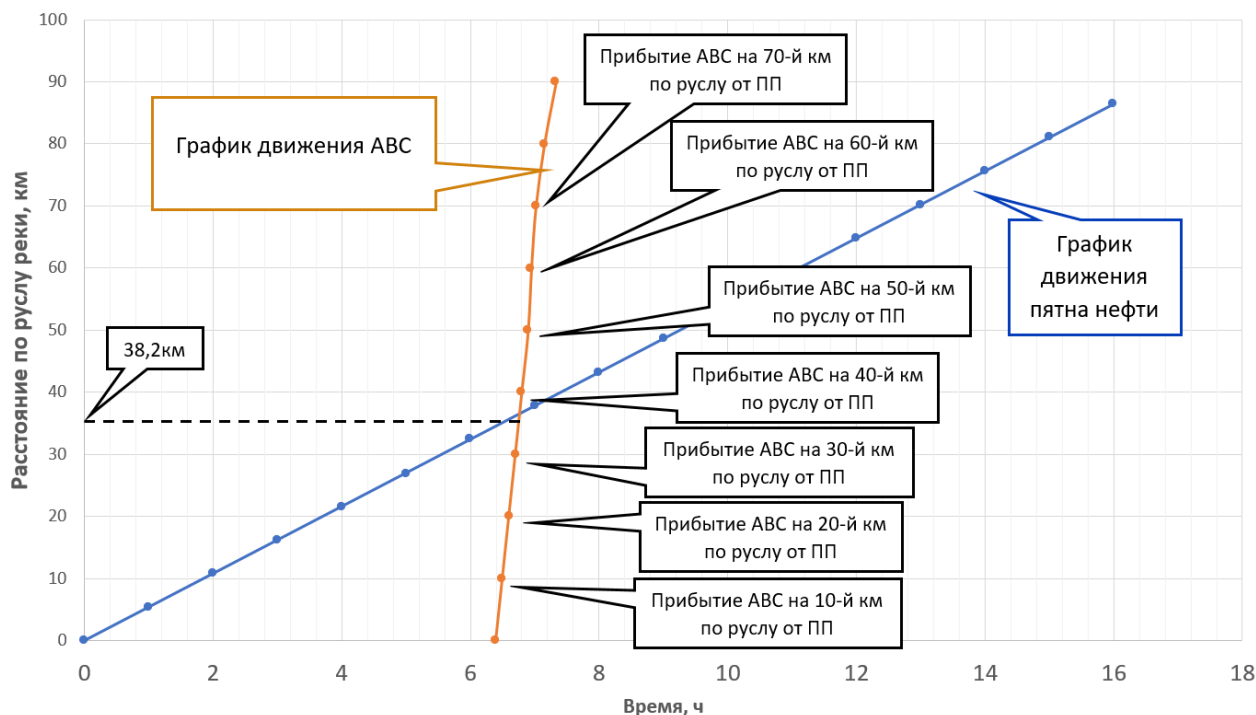


Рисунок 1. – Графики движения пятна нефти и АВС

Затем определяется ближайшая АВС, которая успеет прибыть и развернуться в расчетном месте подхода пятна нефти. При расчете время реагирования АВС находится по формуле:

$$T_{ABC} = T_{CB} + T_{ДВ} + T_{РАЗВ}, \quad (2)$$

где T_{ABC} – время сбора, движения и разворачивания АВС, час;

T_{CB} – время сбора АВС, час (принято 3 часа);

$T_{ДВ}$ – время движения АВС, час;

$T_{РАЗВ}$ – время разворачивания АВС, час (принято 1,5 часа).

Время движения АВС $T_{ДВ}$ будет зависеть от расстояния, которое нужно преодолеть бригаде, и от скорости, с которой бригада будет двигаться по дороге. Для этого:

- скорость движения АВС по дороге с асфальтовым покрытием принята 60 км/ч;
- скорость движения АВС по грунтовой (просёлочной) дороге принята 30–40 км/ч.

Так как место прибытия аварийной бригады для сбора нефти пока неизвестно, для построения графика прибытия АВС на место сбора нефти мы предусмотрели точки на берегу реки на расстоянии от ПП в 10 км, 20 км, 30 км и так далее. К каждому участку был выбран наиболее быстрый маршрут (по сайту www.google.com/maps), оценена протяжённость маршрута по дорогам с асфальтовым покрытием и без него и рассчитано время на прибытие АВС. Результаты расчёта представлены на рисунке 1.

Точка пересечения графиков и будет минимальным расстоянием по руслу реки от подводного перехода, где возможно остановить «голову» нефтяного пятна. По результатам проведенных расчётов это расстояние составило 38,2 км. Таким образом было определено минимальное расстояние, на котором АВС будет готова поймать пятно нефти.

Этап 2. Картографический поиск

Этап заключается в анализе спутниковой съёмки изучаемых участков и предварительном назначении возможных мест улавливания нефти. Нами была проанализирована ситуация по спутниковой съёмке и выбрано 12 предполагаемых площадок для аварийного сбора нефти. Все площадки проверены на соответствие требованиям ГОСТ 34881-2022².

Было оценено время выдвижения АВС на каждую из этих площадок и подготовлены краткие описания каждого из рубежей.

Например, для предполагаемого размещения рубежа при анализе спутниковой съёмки найдена площадка № 1 на расстоянии 39,3 км по руслу от подводного перехода. Для неё рассчитано время движения нефти в паводок (7 часов 16 минут) и в межень (18 часов). Расчётное время подъезда АВС составило 6 часов 48 минут.

² ГОСТ 34881-2022. Заграждения боновые стационарные для локализации разлива нефти и нефтепродуктов. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2022. – 26 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index/78/78793.htm>.

Этап 3. Рекогносцировка на местности

Проведена рекогносцировка – выезд на местность для проверки данных картографических изысканий. В результате проверки рубежей выявлено следующее.

К рубежу № 1 отсутствует подъезд. Рубеж находится на расстоянии 39,3 км от подводного перехода по руслу реки.

В ходе анализа рубежа № 2 было установлено, что он является наиболее удобным для подъезда и разворачивания аварийных бригад. На основании характеризующих данных этого рубежа, в дальнейшем проводились топографическая съёмка, гидрометрические измерения, измерения скорости воды по имеющемуся уровню воды и измерения глубин реки. Площадка № 2 имеет ровную территорию, удобную для расположения оборудования и разворота техники, несколько спусков к воде. Имеется повышение в сторону деревни, которое, предположительно, не затопливается в паводок.

Территория возле площадки № 3 является курганным могильником IX–XII века. Во время паводка подъезд к площадке № 3 будет затоплен. С гидрологической точки зрения месторасположение рубежа подобрано верно.

Подъезд к площадке № 4 затруднен, на дороге наблюдаются эрозионные процессы. Берега крутые, подмываемые. Затруднена установка якорей на противоположном берегу.

Площадка № 5 при рекогносцировке исключена из рассмотрения ввиду того, что рубеж будет находиться на противоположном берегу реки Сож по отношению к избранному для движения аварийной колонны маршруту, а в данный момент идет реконструкция моста через реку Сож в городе Чериков. Проезд возможен только через понтонную переправу.

Площадку № 6 можно использовать как резервную. Она приемлема по всем критериям. На рубеже находится брод, вследствие чего малые глубины позволяют в межень перемещаться на противоположный берег. Рядом находится деревня. Уступает площадке № 2 только по расстоянию от подводного перехода.

Подъезд к площадке № 7 тянется по пойме реки и затопливается в паводок. Крутые берега затрудняют спуск плавсредств и установку бонов. Берег подмывается, обнаружены следы незавершённого меандрирования реки.

Подъезд к площадке № 8 также тянется по пойме реки и затопливается в паводок. Крутые берега затрудняют спуск плавсредств и установку бонов. Берег подмывается, обнаружены следы незавершённого меандрирования реки.

На площадки №№ 9–12 принято решение не выезжать в связи с обнаружением заведомо лучших вариантов, а также высокой отдаленности данных рубежей от подводного перехода.

Этап 4. Топографическая и гидрометрическая съёмка

4.1. Проведение топографической съёмки

Основной целью геодезических работ являлось создание топографического плана для наиболее перспективного рубежа № 2 масштаба 1:500 с высотой сечения рельефа 0,5 метров территории, выбранной в качестве предполагаемого стационарного рубежа локализации и сбора нефти на реке. Местоположение объекта – площадка на реке Сож, расположенная рядом с деревней Мирагощ (рисунок 2). Топографический план создан на основании результатов тахеометрической съёмки. Объём выполненных работ составил 10,6 га.

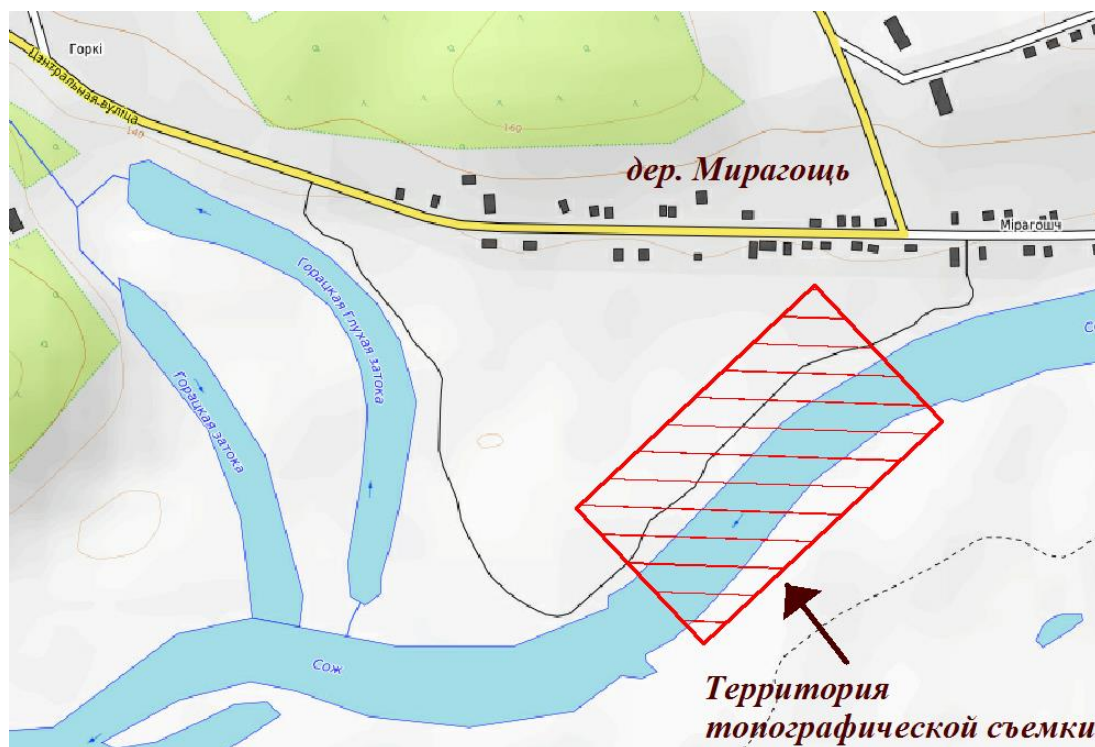


Рисунок 2. – Территория, на которой выполнялась топографическая съёмка

В связи с отсутствием как на территории выбранного стационарного рубежа, так и поблизости исходной геодезической основы было принято решение определить GNSS-методами пункты, впоследствии являющиеся исходными для развития съемочного обоснования. Для определения исходных пунктов съемочного обоснования использовалась спутниковая сеть точного позиционирования Республики Беларусь (ССТП)³. Определение исходных пунктов съемочного обоснования выполнено с использованием спутникового двухчастотного GNSS-оборудования Trimble R8 в режиме RTK (Real Time Kinematic), что допускается согласно СН 1.02.09-2019 «Инженерные изыскания для строительства»⁴. Для пересчета геодезических высот в нормальные использовалась модель геоида EGM2008.

Пункты, являющиеся исходными для развития съемочного обоснования, представлены на территории стационарного рубежа в виде 2-х заложённых на глубину 60–70 сантиметров временных реперов, вокруг которых выполнена окопка (рисунок 3). Координаты данных пунктов определены в системе геодезических координат ITRF2005 (таблица 1), а также в проективной системе координат СК-63, отметки пунктов представлены в Балтийской системе высот 1977-го года (см. таблицу 1).

Таблица 1. – Геодезические координаты исходных пунктов съемочного обоснования

№ репера	ITRF2005		
	B°	L°	H, м
Рп № 1	53,5340392694	31,3439037306	154,943
Рп № 2	53,5352983667	31,3457196056	154,798



а



б

а – окопка репера; *б* – репер

Рисунок 3. – Временный пункт, являющийся исходным для развития съемочного обоснования

Съемочная геодезическая сеть создана путем проложения теодолитного хода. Отметки пунктов съемочной геодезической сети определены методом тригонометрического нивелирования в прямом и обратном направлениях, что допускается согласно п.5.6.30 СН 1.02.09-2019⁵.

Угловые и линейные измерения произведены высокоточным электронным тахеометром Leica TCR1201 1'' № 217577, прошедшим в установленном порядке государственную поверку средств измерений. Метрологическое обеспечение средств измерений соответствует требованиям технических нормативных правовых актов. В качестве системы координат использована СК-63. Отметки пунктов определены в Балтийской системе высот 1977 г.

Съемка всей территории производилась высокоточным электронным тахеометром Leica TCR1201 1'' № 217577 полярным способом с точек съемочной геодезической сети.

Вычерчивание инженерно-топографического плана произведено согласно ТКП 45-1.02-293-2015 (02250) «Инженерные изыскания для строительства. Условные обозначения для инженерно-топографических планов

³ Технологическая инструкция по использованию глобальных навигационных спутниковых систем при выполнении работ по технической инвентаризации и проверке характеристик недвижимого имущества / ГУП «Национальное кадастровое агентство». – Минск, 2018.

⁴ СН 1.02.09-2019. Инженерные изыскания для строительства. – Минск, 2020. URL: <https://stroystandart.info/index.php?name=files&op=view&id=5350>.

⁵ См. сноску 4.

масштабов 1:1000, 1:500, 1:200»⁶. Инженерно-геодезические работы выполнены в соответствии с требованиями «Строительных норм Республики Беларусь» (СН 1.02.09-2019).

Схема съёмочной геодезической сети представлена на рисунке 4, а технические характеристики – в таблицах 2, 3.

Таблица 2. – Технические характеристики плановой съёмочной геодезической сети

Теодолитный ход					
Точки хода от.....до	Длина, км	Кол-во углов	Невязка угло- вая, мин.	Допустимая угловая невязка, мин.	S/Fs
Рп № 1...Рп № 2	0,501	6	0,4	2,4	4175

Примечание.

– Допустимая угловая невязка вычислена по формуле (согласно СН 1.02.09-2019)

$$f_B = 1' \cdot \sqrt{n}, \quad (3)$$

где n – число углов в ходе.

– Обработка плановых измерений выполнена в программном комплексе Credo-DAT.

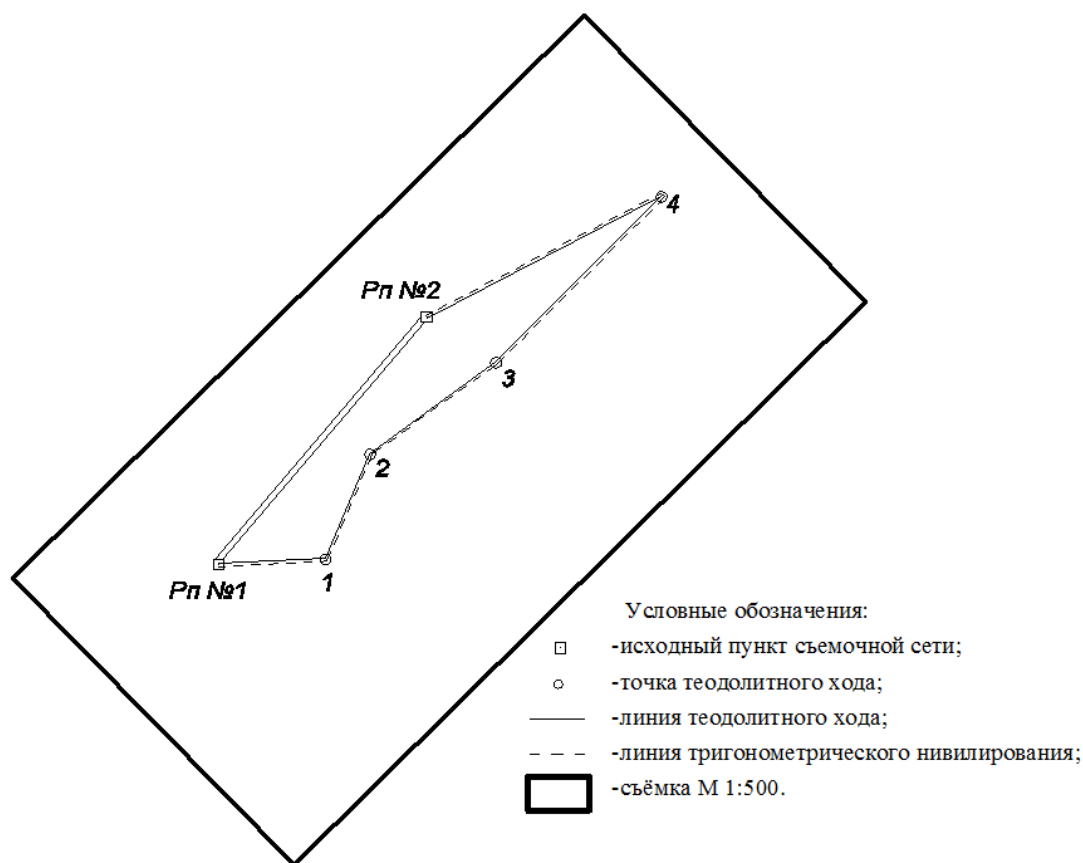


Рисунок 4. – Схема съёмочной геодезической сети

Таблица 3. – Технические характеристики высотной съёмочной геодезической сети

Ход тригонометрического нивелирования			
№ начальной и конечной точки хода	Длина хода, км	Высотные невязки	
		Фактическая, мм	Допустимая, мм
Рп № 1...Рп № 2	0,501	39	±91

Примечание.

– Допустимая невязка хода тригонометрического нивелирования вычислена по формуле (согласно СН 1.02.09-2019)

$$f_h = 0,04 \cdot S / 100 \cdot \sqrt{n}, \quad (4)$$

⁶ ТКП 45-1.02-293-2015 (02250). Инженерные изыскания для строительства. Условные обозначения для инженерно-топографических планов масштабов 1:1000, 1:500, 1:200. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2014. – 137 с.

где S – длина хода;
 n – число сторон хода.
– Обработка высотных измерений выполнена в программном комплексе Credo-DAT.

4.2. Проведение гидрометрической съёмки

Проведение гидрометрической съёмки осуществлялось с поверхности воды. Для промеров поверхностной скорости течения использовалась гидрометрическая вертушка ГМЦМ-1, для промера глубин – телескопически раскладывающиеся гидрометрические рейки. Промерные работы были выполнены по 4 створам.

С поверхности воды промерные работы осуществлялись при помощи плавательного средства – надувного туристического катамарана модели «Кубань (Кулик-2)» (рисунок 5).



a

б

a – катамаран, оснащённый якорем; *б* – проведение измерений

Рисунок 5. – Проведение гидрометрических работ

Графическое представление результатов геодезических и гидрометрических работ приведено на рисунке 6.

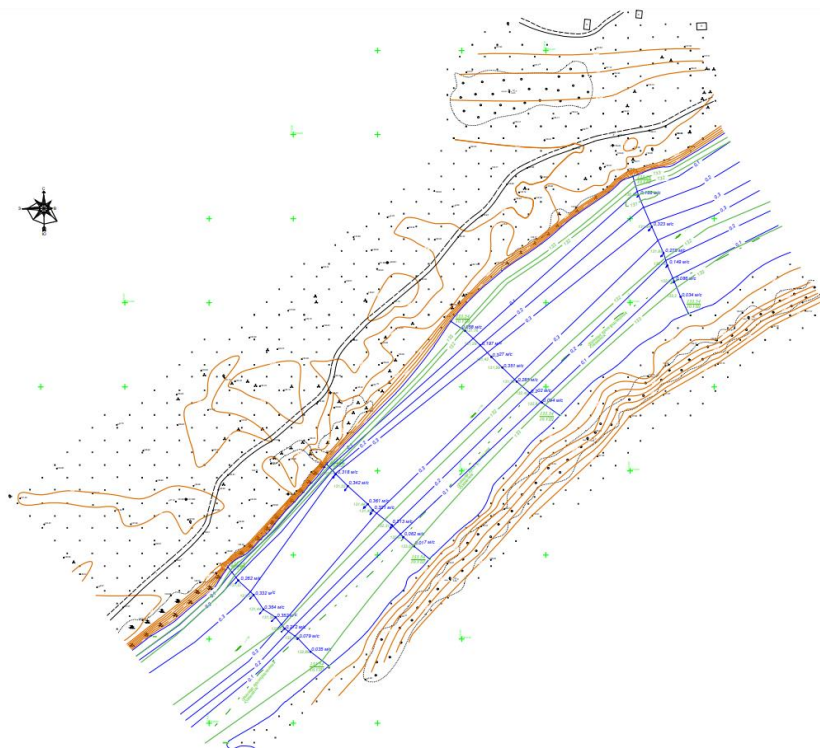


Рисунок 6. – Результаты топографической и гидрологической съёмки

Заключение. Выбранный рубеж возле д. Мирогощ на расстоянии 43,4 км по руслу от подводного перехода магистрального нефтепровода «Унеча-Полоцк» обеспечивает хорошие условия для локализации возможного разлива нефти.

Аварийно-восстановительная служба оператора магистрального нефтепровода будет иметь запас времени на сбор, движение и разворачивание:

- расчётное время готовности АВС к локализации разлива: 6 часов 48 минут;
- расчётное время движения нефти: в паводок: 8 часов, в межень: 20 часов.

Площадка рубежа ровная, открытая. Растительность минимальная. Противоположный берег реки удобен для расположения оттягивающих якорей. Меандрирование реки слабое, что позволит использовать площадку несколько десятилетий. В меженный период площадка имеет два варианта подъезда (при условии ремонта грунтовых дорог).

Немаловажным является и тот факт, что обоснованный в данном исследовании рубеж для сбора нефти расположен выше по течению реки Сож от биологического заказника «Чериковский». Это позволяет создать надежную защиту земель данного заказника при аварийном разливе нефти на подводном переходе магистрального нефтепровода «Унеча-Полоцк».

ЛИТЕРАТУРА

1. Блакітная кніга Беларусі: (водныя аб'екты Беларусі): энцыкл. / Н.А. Дзісько, М.М. Курловіч, Я.В. Малашэвіч і інш. – Мінск: БелЭн, 1994. – 415 с.

REFERENCES

1. Dzis'ko, N.A., Kurlovich, M.M., Malashevich, Ya.V. & Zagarnodni, V.G. (1994). *Blakitnaya kniga Belarusi: (vodnyya ab'ekty Belarusi): entsykl.* Minsk: BelEn. (In Belarus.).

Поступила 08.11.2023

SELECTION OF A BOARD LOCATION FOR OIL COLLECTION IN THE EVENT OF A POSSIBLE ACCIDENT AT THE UNDERWATER OIL PIPELINE CROSSING

A. KULBEI, S. BOSLOVYAK, V. YALTYHOV, K. MARKOVICH
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article is devoted to the substantiation of technical solutions for choosing a stationary line for collecting oil for an underwater crossing of an operator of main oil pipelines in the Republic of Belarus. To study the landscape conditions of the territory selected as the proposed stationary boundary for the localization and collection of oil on the river, a tacheometric survey of the area was carried out. The result of geodetic and hydrometric works was a topographic plan of the area with plotted elevation lines of the relief section, including the bottom of the river, and hydroisotates of the watercourse flow velocities. The selected boundary provides optimal conditions for localizing a possible oil spill.

Keywords: topographic survey, hydrometric survey, coordinate system.