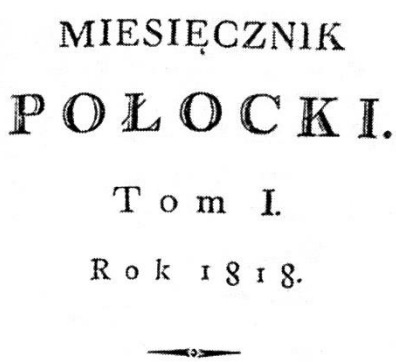
№ 1(33), 2023


MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.
Tom I.
Rok 1818.

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

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия F. Строительство. Прикладные науки

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

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

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

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

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

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

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

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

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

Подписано к печати 29.06.2023. Бумага офсетная 70 г/м^2. Формат 60×84$^1/_8$. Ризография.
Усл. печ. л. 12,09. Уч.-изд. л. 14,58. Тираж 35 экз. Заказ 323.

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.012.4545 **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-2-9**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ПОСЛЕ РАЗРУШЕНИЯ

д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ[1]),
канд. техн. наук Э. ЧАПАРАНГАНДА[2])
([1])Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
[2])Ботсванский международный университет науки и технологий)

В статье приводятся результаты экспериментально-теоретического исследования изгибаемых железобетонных элементов при действии статической нагрузки, доведенных до разрушения и восстановленных с заменой участка деформированной рабочей арматуры, в том числе и с предварительным напряжением нового участка арматуры. Установлены особенности их работы под нагрузкой.

Выполнено на основе общей деформационной модели поперечного сечения моделирование напряженно-деформированного состояния восстановленных изгибаемых железобетонных элементов, а также сопоставление вычисленных параметров напряженно-деформированного состояния с их опытными значениями.

Ключевые слова: *изгибаемый железобетонный элемент, исходная опытная балка, восстановленная опытная балка, напряженно-деформированное состояние, бетон, арматура, разрушающий изгибающий момент, ширина раскрытия трещин, прогиб балки.*

Введение. В процессе эксплуатации железобетонных конструкций зданий и сооружений при воздействии условий окружающей среды (попеременного замораживания и оттаивания в водонасыщенном состоянии, высоких температур, химического воздействия и др.) в ряде случаев на отдельных участках конструкций существенно снижается прочность бетона, уменьшается площадь поперечного сечения рабочей арматуры. Кроме того, в случае землетрясений, взрывов, аварий техногенного характера происходит разрушение бетона и арматуры железобетонных конструкций в зоне максимального воздействия.

Одним из путей реконструкции зданий и сооружений может быть восстановление разрушенных железобетонных конструкций путем замены разрушенного бетона и арматуры.

Экспериментально-теоретическое исследование изгибаемых железобетонных элементов, восстановленных после разрушения, включало испытание опытных балок для выявления особенностей их деформирования под нагрузкой, моделирование их напряженно-деформированного состояния (НДС), расчет и сопоставление с опытными значениями основных параметров НДС на основе общей деформационной модели поперечного сечения железобетонных конструкций [1, с. 224–230; 2; 3].

Методика экспериментального исследования. Для проведения исследования напряженно-деформированного состояния восстановленных после разрушения изгибаемых железобетонных элементов в лабораторных условиях было изготовлено 8 опытных железобетонных балок длиной 1500 мм и размерами поперечного сечения 80×160 мм.

Опытные балки были изготовлены из мелкозернистого бетона со средней плотностью 2340 кг/м^3 и средними значениями призменной прочности при сжатии f_{cm}=10,2...10,8 МПа, начального модуля упругости E_{cm}=23·10^3 МПа и прочности при растяжении f_{ctm}=1,08 МПа. Прочностные и деформационные характеристики бетона определялись во время испытаний специальных образцов (призм, кубов) при сжатии и раскалывании.

В качестве рабочей арматуры растянутой зоны опытных балок применялась свариваемая стержневая горячекатаная арматура из стали марки 35ГС диаметром 12 мм со средними значениями предела текучести σ_{ym}=437...450 МПа, временного сопротивления σ_{um}=634...658 МПа и модуля упругости E_s=2,1·10^5 МПа. С целью исключения возможности разрушения опытных балок в зоне среза их приопорные зоны длиной 500 мм были армированы поперечной арматурой из проволоки диаметром 4 мм с шагом 75 мм.

Испытание исходных опытных балок проводилось по балочной схеме с шарнирным опиранием по концам двумя сосредоточенными силами, приложенными в третях пролета. В процессе испытаний вплоть до разрушения измеряли деформации бетона и арматуры, прогиб, ширину раскрытия трещин.

После разрушения опытных балок с помощью механизированного инструмента вырубался бетон в средней трети балок, оголялась рабочая арматура. Рабочая арматура в растянутой зоне вырезалась, и к концам существующей арматуры внахлест на длине 150 мм приваривался отрезок заменяющей арматуры. В качестве заменяющей рабочей арматуры опытных балок использовалась арматура из того же стержня, что и арматура исходной балки.

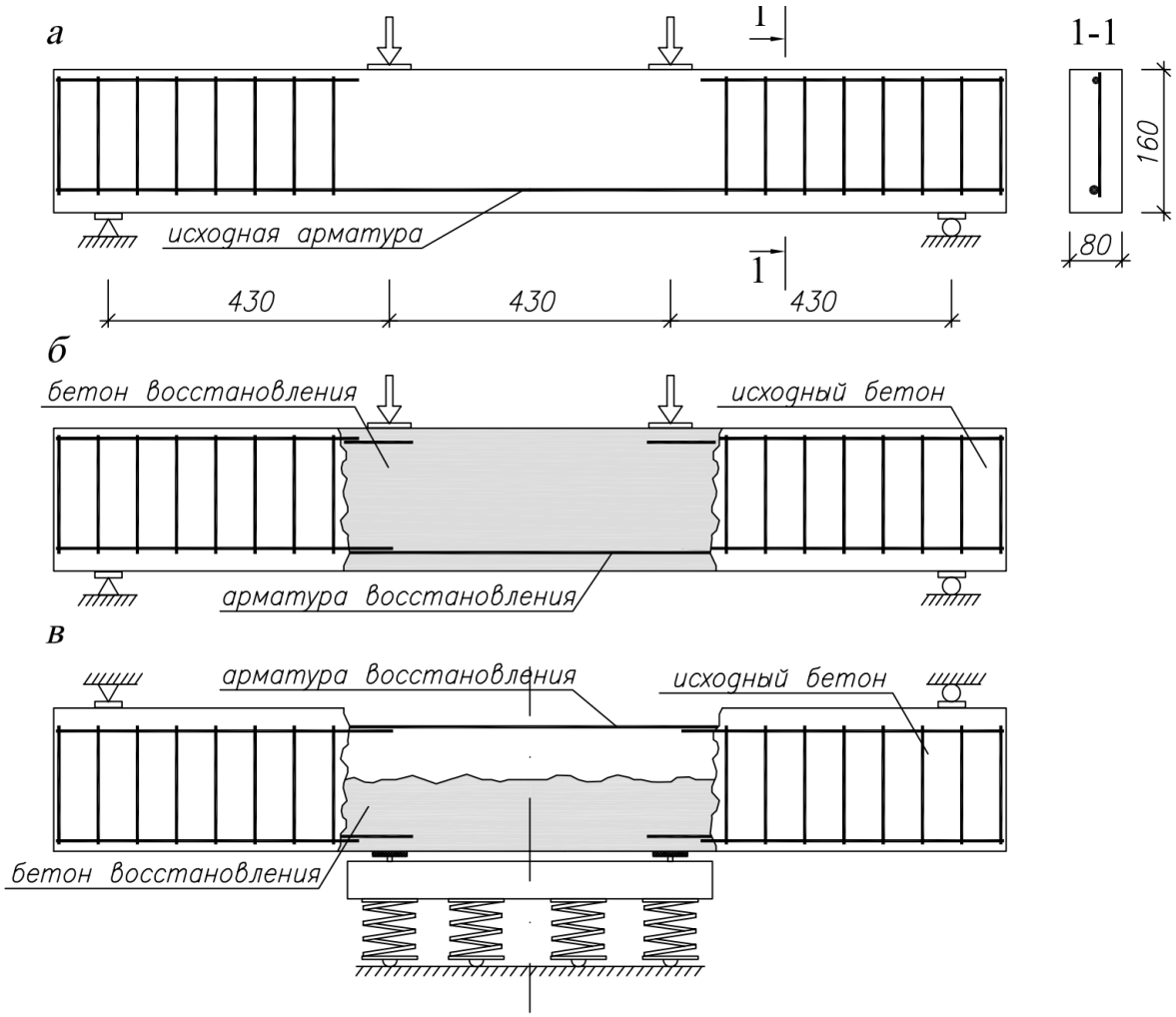
После этого опытная балка устанавливалась в опалубку и производилось бетонирование средней трети балки.

Балки Б-V…Б-VIII восстанавливались с предварительным напряжением восстановленного участка арматуры. Для этого сохраняемые участки балок по концам с восстановленной рабочей арматурой устанавливались со строительным подъемом, затем бетонировалась сжатая зона конструкции. После набора прочности бетона сжатой зоны опытную балку нагружали предварительно сжатыми пружинами, которые освобождали после их установки (рисунок 1). При этом заменяющая арматура в растянутой зоне балок получала предварительное растягивающее напряжение, затем производили бетонирование растянутой зоны балок в нагруженном состоянии. Величина предварительного напряжения подбиралась такая, чтобы исключить образование трещин в верхней зоне балок при отпуске, и контролировалась по деформациям арматуры с помощью тензорезисторов. Предварительное напряжение в момент времени бетонирования составляло 200 МПа. После набора прочности бетоном растянутой зоны пружины сжимали, освобождая восстановленную балку от нагрузки. Предварительное напряжение восстановленной арматуры после отпуска натяжения согласно показаниям тензорезисторов составляло 172...184 МПа.

Для восстановления опытных балок после разрушения применялся мелкозернистый бетон со следующими прочностными и деформационными характеристиками в момент испытания восстановленных опытных балок: f_{cm}=11,2...19,5 МПа, E_{cm}=(23...31,1)·10^3 МПа, f_{ctm}=1.1...1,64 МПа.

Испытание восстановленных опытных балок производилось по аналогичной схеме, что и испытание исходных балок.

Номенклатура, геометрические размеры поперечных сечений и характеристики свойств материалов опытных балок (исходных и восстановленных) приведены в таблице 1.



***а* – схема испытания и конструкция исходных опытных балок;**
***б* – схема испытания и конструкция восстановленных опытных балок;**
***в* – схема предварительного напряжения восстановленной рабочей арматуры**

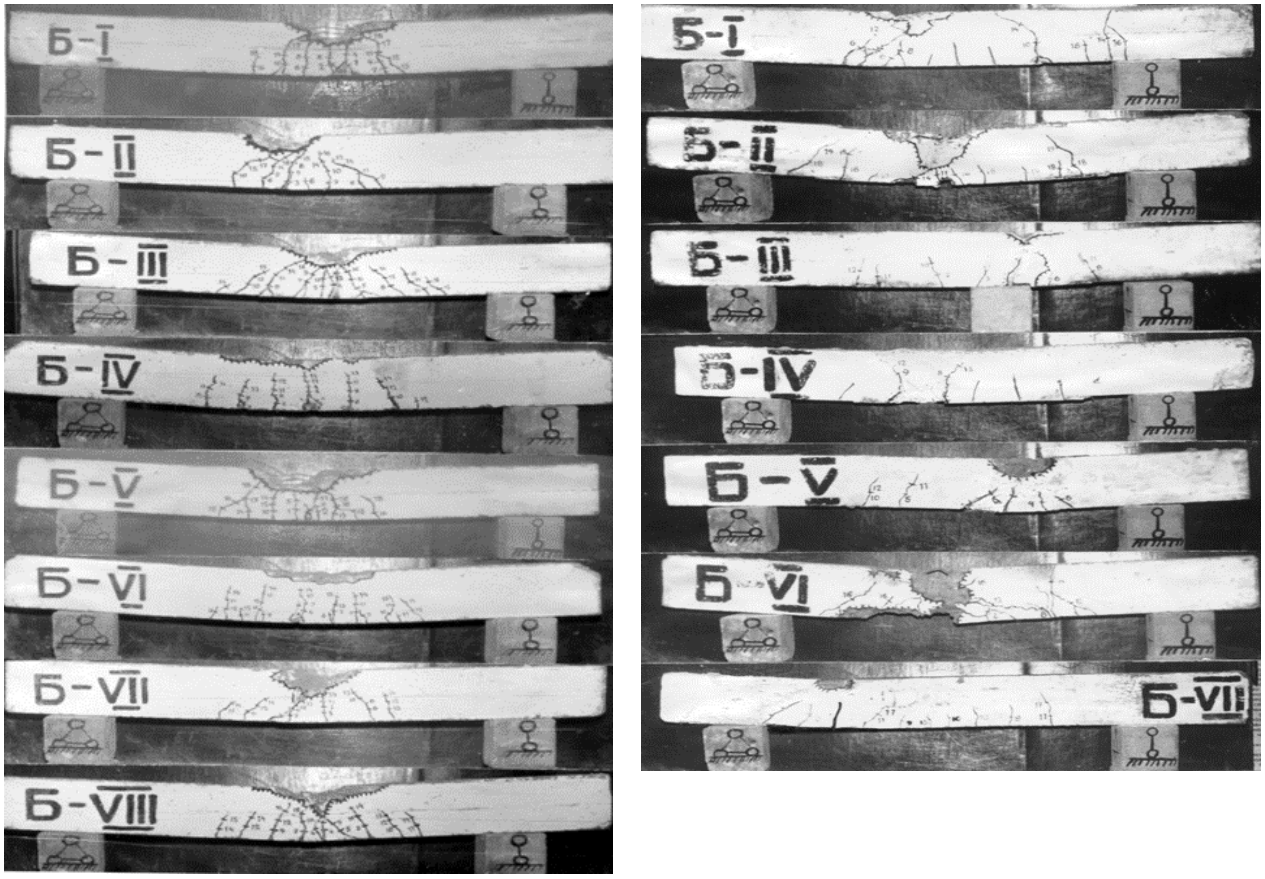
Рисунок 1. – Схема испытания и конструкция опытных балок

Таблица 1. – Номенклатура, размеры сечений и характеристики материалов опытных балок

Шифр балки	Размеры сечения исходной балки			Бетон исходной балки			Исходная и заменяющая арматура			Бетон восстановленной части балки			Размеры сечения балки после восстановления		
	b, мм	h, мм	d, мм	f_{cm}, МПа	f_{ctm}, МПа	E_c10^3, МПа	σ_{ym}, МПа	σ_{um}, МПа	E_s10^5, МПа	f_{cm}, МПа	f_{ctm}, МПа	E_c10^3, МПа	b, мм	h, мм	d, мм
Б-I	85	160	135	10,8	1,08	23,0	450	658	2,1	11,2	1,1	23,0	88	165	144
Б-II	80	159	132	10,8	1,08	23,0	437	634	2,1	11,2	1,1	23,0	83	167	150
Б-III	80	155	130	10,2	1,08	23,0	437	634	2,1	19,5	1,64	31,1	82	170	148
Б-IV	85	160	132	10,2	1,08	23,0	450	658	2,1	19,5	1,64	31,1	87	160	144
Б-V	85	162	137	10,8	1,08	23,0	437	634	2,1	11,2	1,1	23,0	88	168	139
Б-VI	85	165	138	10,8	1,08	23,0	450	658	2,1	11,2	1,1	23,0	86	170	136
Б-VII	80	160	135	10,2	1,08	23,0	437	634	2,1	19,5	1,64	31,1	84	168	138
Б-VIII	80	160	132	10,2	1,08	23,0	437	634	2,1	19,5	1,64	31,1	85	170	148

Результаты экспериментального исследования. Разрушение опытных балок, как исходных, так и восстановленных, происходило в зоне действия максимального изгибающего момента в результате достижения растянутой арматурой предела текучести с последующим разрушением бетона сжатой зоны, за исключением одной восстановленной балки Б-VIII, разрушение которой было вызвано разрывом продольной арматуры балки в месте приварки при нагрузке, составляющей 65% от разрушающей нагрузки исходной балки. Это связано с прожогом и охрупчиванием арматуры при электродуговой сварке (нарушение режима сварки в виде чрезмерной силы тока). Характер разрушения исходных и восстановленных опытных балок после разрушения приведен на рисунке 2.

Особенностью трещинообразования восстановленных опытных балок являлось более раннее образование трещин нормального отрыва в месте контакта бетона исходных балок и нового бетона, что объясняется величиной адгезии нового и старого бетона, меньшей чем прочность бетона на растяжение. Расстояние между трещинами, средняя ширина их раскрытия и прогиб исходных балок и восстановленных после разрушения практически не отличались на всех этапах нагружения. Увеличение прочности бетона восстановленных балок в зоне чистого изгиба уменьшало деформативность и повышало несущую способность по сравнению с исходными балками. Предварительное напряжение рабочей арматуры восстановленных балок Б-V…Б-VII уменьшало их деформативность и ширину раскрытия трещин нормального отрыва по сравнению с исходными опытными балками.



а **– исходные опытные балки** ***б*** **– восстановленные опытные балки**

Рисунок 2. – Вид опытных балок после разрушения

Моделирование НДС изгибаемых железобетонных элементов, восстановленных после разрушения. Общая деформационная модель поперечного сечения железобетонных элементов, основанная на гипотезе плоского сечения для распределения осредненных деформаций по сечению, уравнениях равновесия и диаграммах деформирования бетона и арматуры, позволяет получить основные параметры НДС железобетонных элементов при действии нагрузки на любом этапе их работы[1] [1, с. 224–230; 2; 3].

Расчет разрушающего изгибающего момента, момента образования и ширины раскрытия трещин нормального отрыва, прогиба в середине пролета при эксплуатационной нагрузке исходных опытных балок выполнялся по разработанной методике [1, с. 224–230].

Для изгибаемых железобетонных элементов уравнения напряженно-деформированного состояния имеют вид:

$$\sum_{i=1}^{k}\sigma_{ci}A_{ci}\left(y_0-y_{ci}\right)+\sum_{i=k+1}^{n}\sigma_{si}A_{si}\left(y_0-y_{si}\right)-M=0;$$

$$\sum_{i=1}^{k}\sigma_{ci}A_{ci}+\sum_{i=k+1}^{n}\sigma_{si}A_{si}=0; \qquad (1)$$

$$\varepsilon_{(c,s)i}=\frac{1}{r}\left(y_0-y_{(c,s)i}\right), \qquad \sigma_{(c,s)i}=f(\varepsilon_{(c,s)i}),$$

где M – изгибающий момент от внешней нагрузки;

$\sigma_{(c,s)i}$ и $\varepsilon_{(c,s)i}$ – нормальные напряжения и относительные деформации соответственно в i-той элементарной площадке бетона или арматуры;

$A_{(c,s)i}$ и $y_{(c,s)i}$ – соответственно площадь сечения и расстояние от выбранной оси до центра тяжести i-той элементарной площадки бетона или арматуры;

y_0 – расстояние от выбранной оси до центра тяжести сечения;

k и $(n-k)$ – количество элементарных площадок соответственно бетона и арматуры в поперечном сечении.

Пример вычисленного распределения относительных деформаций и напряжений по поперечному сечению исходной опытной балки Б-I в предельном по прочности состоянии приведен на рисунке 3.

Критерием образования трещин нормального отрыва является достижение элементарным слоем бетона на уровне центра тяжести арматурного стержня предельных относительных деформаций $\varepsilon_{ctm,u}$. Максимальное значение изгибающего момента M_u, при котором выполняются условия равновесия (1) в поперечном сечении с трещиной, соответствует прочности железобетонного элемента.

Для вычисления изгибающего момента образования трещин M_{cr} и соответствующего его прочности M_u использовалась билинейная диаграмма деформирования свободной арматуры[2,3,4]: в первом случае вследствие ее совместной работы с бетоном без сдвигов; во втором – вследствие приближения коэффициента ψ_s к значению, равному 1[5].

Вычисление жесткости участка по длине изгибаемого железобетонного элемента с трещинами для расчета прогибов опытных плит производилось с учетом работы растянутого бетона как среднее значение суммы жесткостей элементарных площадок бетона и арматуры по границам участка

$$(EI)_j=\frac{\left[\sum_{i=1}^{n}E_{(c,s)i}A_{(c,s)i}\left(y_0-y_{(c,s)i}\right)^2\right]_j+\left[\sum_{i=1}^{n}E_{(c,s)i}A_{(c,s)i}\left(y_0-y_{(c,s)i}\right)^2\right]_{j+1}}{2}. \qquad (2)$$

---

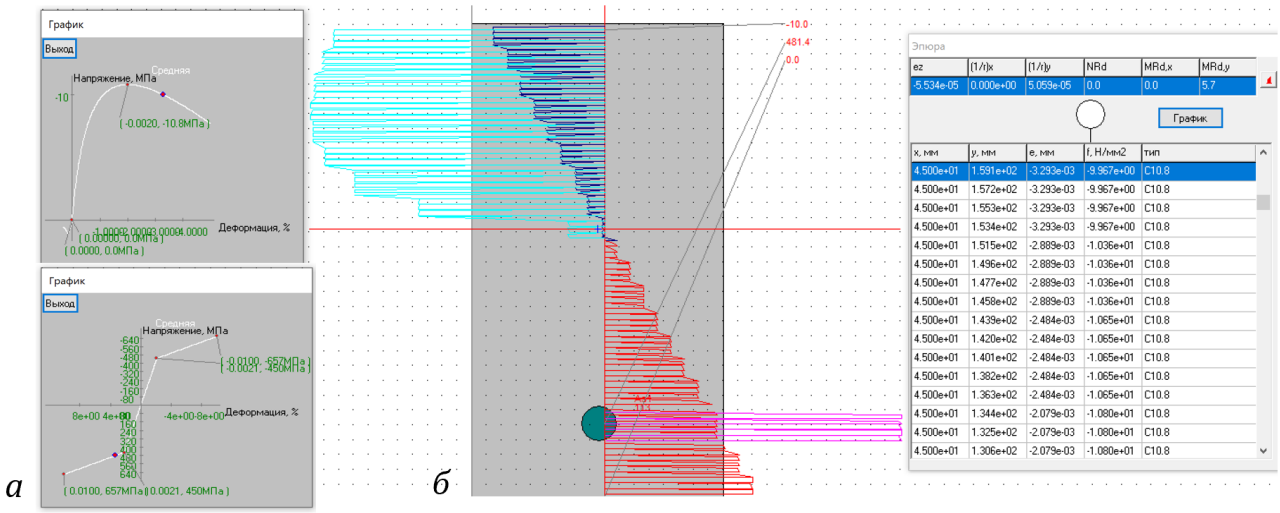
[1] Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования: метод. пособие. – М.: М-во стр-ва и жилищно-коммунального хоз-ва Рос. Федерации, 2017. – 197 с. URL: https://meganorm.ru/Index2/1/4293740/4293740525.htm.

[2] CEB-FIB Model Code for Concrete Structures 2010. URL: https://www.wiley.com/en-us/fib+Model+Code+for+Concrete+Structures+2010-p-9783433604083.

[3] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003. – Москва, 2018. – 143 с.

[4] СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск, 2020. – 236 с.

[5] Lazouski D., Gluhov D., Lazouski Y. Modeling the behavior of statically indeterminate reinforced concrete structures under load // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сб. науч. ст. XXII Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 29–30 сент. 2022 г. / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест: БрГТУ, 2022. – С. 95–107. URL: https://rep.bstu.by/handle/data/32920.



***а* – диаграммы деформирования бетона и арматуры с отметками красной точкой состояния наиболее сжатого волокна бетона и рабочей арматуры; *б* – распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения (цифры на выносных линиях – напряжения в МПа) (синим и красным цветом – относительные деформации соответственно в сжатой и растянутой зонах: голубым и розовым – аналогично, напряжений)**

Рисунок 3. – Моделирование НДС в поперечном сечении исходной опытной балки Б-I

Результаты сопоставления опытных и расчетных значений разрушающего изгибающего момента M_u, момента образования M_{cr} и среднего значения (в зоне чистого изгиба) ширины раскрытия трещин w, прогибов a для исходных опытных балок приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Экспериментальные и расчетные значения разрушающего изгибающего момента, момента образования и ширины раскрытия трещин, прогибов исходных опытных балок

Шифр балки	M_u^{exp}, кНм	M_u^{th}, кНм	$\frac{M_u^{exp}}{M_u^{th}}$	M_{cr}^{exp}, кНм	M_{cr}^{th}, кНм	$\frac{M_{cr}^{exp}}{M_{cr}^{th}}$	w^{exp}, мм	w^{th}, мм	$\frac{w^{exp}}{w^{th}}$	a^{exp}, мм	a^{th}, мм	$\frac{a^{exp}}{a^{th}}$
Б-I	5,92	5,69	1,04	0,8	0,82	0,97	0,18	0,168	1,07	3,24	3,35	0,97
Б-II	5,08	5,20	0,98	0,8	0,75	1,06	0,16	0,152	1,05	3,46	3,29	1,05
Б-III	4,95	5,05	0,98	0,8	0,72	1,11	0,15	0,146	1,03	3,58	3,35	1,07
Б-IV	5,54	5,45	1,02	0,8	0,80	1,00	0,15	0,153	0,98	3,41	3,13	1,08
Б-V	5,50	5,50	1,00	0,8	0,81	0,98	0,15	0,147	1,02	2,89	2,75	1,05
Б-VI	5,92	5,86	1,01	0,8	0,81	0,98	0,16	0,174	0,92	3,36	3,29	1,02
Б-VII	5,01	5,21	0,96	0,8	0,78	1,03	0,15	0,151	1,00	3,16	3,18	0,99
Б-VIII	5,05	5,15	0,98	0,8	0,78	1,03	0,15	0,151	1,00	3,21	3,33	0,96

Расчет разрушающего изгибающего момента, момента образования и ширины раскрытия трещин нормального отрыва, прогиба в середине пролета при эксплуатационной нагрузке восстановленных после разрушения опытных балок Б-I…Б-IV выполнялся по методике, аналогичной расчету исходных опытных балок, с геометрическими размерами поперечного сечения, соответствующими заменяющему бетону диаграммами деформирования при сжатии и растяжении. При этом не учитывалась работа бетона при растяжении в поперечном сечении балок в месте сопряжения старого и нового бетонов.

Определение параметров НДС восстановленных опытных балок с предварительным напряжением восстановленного участка арматуры A_{pi} производилось в два этапа.

На первом этапе для изгибаемых железобетонных элементов с предварительным напряжением арматуры уравнения НДС имеют вид:

$$\sum_{i=1}^{k}\sigma_{ci}A_{ci}\left(y_0-y_{ci}\right)-\sum_{i=k+1}^{n}\sigma_{pi}A_{pi}\left(y_0-y_{pi}\right)=0;$$

$$\sum_{i=1}^{k}\sigma_{ci}A_{bi}-\sum_{i=k+1}^{n}\sigma_{pi}A_{pi}=0; \qquad (3)$$

$$\varepsilon_{ci}=\frac{1}{r}\left(y_0-y_{ci}\right)+\varepsilon_P,\ \varepsilon_{pi}=\frac{1}{r}\left(y_0-y_{pi}\right)+\varepsilon_{pki}+\varepsilon_P;$$

$$\sigma_{ci}=f(\varepsilon_{ci}),\quad \sigma_{pi}=f(\varepsilon_{pi}),$$

где ε_{pki} – относительная деформация предварительно напряженного i-того стержня арматуры, соответствующая начальному контролируемому значению предварительного напряжения;

ε_P – относительная деформация в центре тяжести поперечного сечения от усилия предварительного напряжения, которая определяется по формуле

$$\varepsilon_P = \frac{\sum_{i=k+1}^{n} \sigma_{pi} A_{pi}}{\sum_{i=1}^{k} E_{ci} A_{ci}}. \tag{4}$$

Относительные деформации на уровне стержней предварительно напряженной арматуры, которые характеризуют потери предварительного напряжения при обжатии, вычисляются по формуле

$$\varepsilon_{1pi} = \frac{1}{r}\left(y_0 - y_{pi}\right) + \varepsilon_P. \tag{5}$$

Расчетом на первом этапе определяются параметры НДС изгибаемого железобетонного элемента после обжатия усилием предварительного напряжения с учетом потерь в стержнях предварительно напряженной арматуры.

На втором этапе расчета железобетонного элемента под действием внешней нагрузки уравнения для вычисления параметров НДС изгибаемого железобетонного элемента с предварительным напряжением арматуры имеют вид:

$$\sum_{i=1}^{k} \sigma_{ci} A_{ci}\left(y_0 - y_{ci}\right) + \sum_{i=k+1}^{n} \sigma_{pi} A_{pi}\left(y_0 - y_{pi}\right) - M = 0;$$

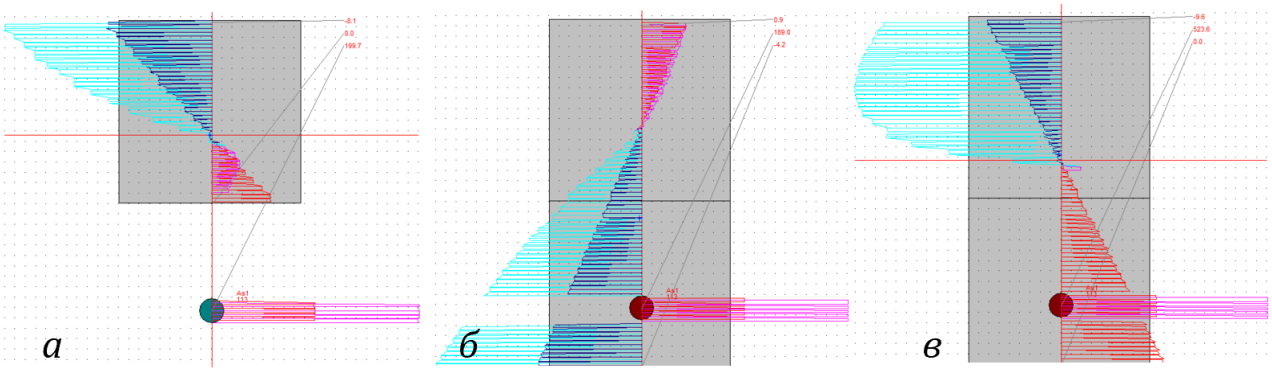
$$\sum_{i=1}^{k} \sigma_{ci} A_{ci} + \sum_{i=k+1}^{n} \sigma_{pi} A_{pi} = 0; \tag{6}$$

$$\varepsilon_{ci} = \frac{1}{r}\left(y_0 - y_{ci}\right) + \varepsilon_{1c,P}, \quad \varepsilon_{pi} = \frac{1}{r}\left(y_0 - y_{pi}\right) + \varepsilon_{pki} + \varepsilon_{1P};$$

$$\sigma_{ci} = f(\varepsilon_{ci}), \quad \sigma_{pi} = f(\varepsilon_{pi}),$$

где ε_{1P} – относительная деформация от действия усилия предварительного напряжения, вычисленная на первом этапе расчета.

Пример вычисленного распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению восстановленной опытной балки Б-V при натяжении восстановленной арматуры в пружинной установке, при отпуске предварительного напряжения восстановленной арматуры после набора прочности бетоном восстановления, а также в предельном по прочности состоянии приведен на рисунке 4.



а **– при натяжении восстановленного участка арматуры;** ***б*** **– при отпуске натяжения;** ***в*** **– в предельном состоянии перед разрушением (распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения) (цифры на выносных линиях – напряжения в МПа) (синим и красным цветом – относительные деформации соответственно в сжатой и растянутой зонах: голубым и розовым – аналогично, напряжений)**

Рисунок 4. – Моделирование НДС в сечении восстановленной опытной балки Б-V

Расчет восстановленных после разрушения опытных балок Б-V…Б-VII с предварительным напряжением арматуры производился в два этапа в соответствии с этапами их восстановления: при отпуске натяжения восстановленного участка арматуры после набора прочности бетоном восстановления и при нагружении внешней нагрузкой.

Расчетное значение предварительного напряжения восстановленного участка арматуры при отпуске его натяжения для восстановленных опытных балок составляло 181...189 МПа, расхождение с экспериментальными значениями не превышает 8%.

Вычисление жесткости участков по длине восстановленных опытных балок для расчета их прогибов производилось с учетом фактических геометрических размеров поперечного сечения и диаграмм деформирования бетона для разных (исходных и восстановленных) участков балок как среднее значение суммы жесткостей элементарных площадок бетона и арматуры по границам участка, без учета работы бетона на растяжение в поперечном сечении в месте стыка исходного и восстановленного бетона.

Результаты сопоставления опытных и расчетных значений параметров НДС восстановленных после разрушения опытных балок: разрушающего изгибающего момента, момента образования и ширины раскрытия трещин нормального отрыва, прогибов, приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Расчет разрушающего изгибающего момента, момента образования и ширины раскрытия трещин, прогибов восстановленных после разрушения опытных балок

Шифр балки	M_u^{exp}, кНм	M_u^{th}, кНм	$\frac{M_u^{exp}}{M_u^{th}}$	M_{crc}^{exp}, кНм	M_{crc}^{th}, кНм	$\frac{M_{crc}^{exp}}{M_{crc}^{th}}$	w^{exp}, мм	w^{th}, мм	$\frac{w^{exp}}{w^{th}}$	a^{exp}, мм	a^{th}, мм	$\frac{a^{exp}}{a^{th}}$
Б-I	6,04	6,20	0,97	0,35	0,91	0,38	0,20	0,177	1,12	3,28	3,06	1,07
Б-II	6,25	6,12	1,02	0,35	0,83	0,42	0,20	0,179	1,11	3,56	3,35	1,06
Б-III	7,12	6,87	1,04	0,4	1,21	0,33	0,21	0,18	1,16	3,08	2,77	1,11
Б-IV	7,04	6,91	1,02	0,4	1,20	0,33	0,21	0,198	1,05	3,17	2,89	1,10
Б-V	6,35	6,32	1,00	3,8	4,2	0,90	0,05	0,042	1,19	1,54	1,48	1,04
Б-VI	6,62	6,30	1,05	3,8	4,32	0,88	0,05	0,053	0,94	1,67	1,52	1,09
Б-VII	6,35	6,48	0,98	3,8	4,61	0,82	0,05	0,044	1,13	1,75	1,68	1,04
Б-VIII	3,24	-	-	-	4,43	-	-	0,038	-	-	1,56	-

Анализ результатов моделирования НДС и расчета его основных параметров восстановленных опытных балок показывает удовлетворительную сходимость с опытными значениями.

Заключение. Проведенные экспериментально-теоретические исследования:

– подтвердили возможность восстановления изгибаемых железобетонных конструкций после их разрушения на отдельных участках;

– позволили установить общую картину и основные особенности работы под нагрузкой восстановленных после разрушения изгибаемых железобетонных конструкций, в том числе с предварительным напряжением восстановленного участка рабочей арматуры;

– подтвердили применимость общей деформационной модели к расчету параметров НДС изгибаемых железобетонных конструкций, восстановленных после разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 1998. – 240 с.
2. Расчетная модель напряженно-деформированного состояния статически неопределимых железобетонных конструкций / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, Е.Д. Лазовский и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Стр-во. Прикладные науки. – 2022. – № 14. – С. 29–44.
3. Work modelling of bending reinforced concrete elements under load / E. Chaparanganda, D. Lazouski, Y. Lazouski et al. // Journal of New Results in Science. – 2021. – № 10(1). – P. 100–114.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lazovskii, D.N. (1998). *Usilenie zhelezobetonnykh konstruktsii ekspluatiruemykh stroitel'nykh sooruzhenii*. Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ.).
2. Lazovskii, D.N., Lazovskii, E.D, Glukhov, D.O. & Gil', A.I. (2022). Raschetnaya model' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruktsii [Computational model of the stress-strain state of statically indeterminate reinforced concrete structures]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences], (14),* 29–44. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Chaparanganda, E., Lazouski, D., Lazouski, Y. & Glukhov, D. (2021). Work modelling of bending reinforced concrete elements under load. *Journal of New Results in Science, 10(1),* 100–114.

Поступила 21.04.2023

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS RESTORED AFTER DESTRUCTION

D. LAZOUSKI[1], E. CHAPARANGANDA[2]
([1]Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,
[2]Botswana International University Of Science And Technology)

The article presents the results of an experimental and theoretical study of bent reinforced concrete elements under the action of a static load. Experimental bending elements were brought to destruction and then restored with the replacement of the section of the deformed working reinforcement. Several test slabs were rebuilt with a new section of rebar prestressed. The features of work under load of bent reinforced concrete elements restored after destruction are established.

Performed, on the basis of the general deformation model of the cross section, modeling of the stress-strain state of the restored bending reinforced concrete elements. Comparison of the calculated main parameters of the stress-strain state with their experimental values showed satisfactory convergence.

Keywords: *bent reinforced concrete element, original experimental beam, restored experimental beam, stress-strain state, concrete, reinforcement, breaking bending moment, crack opening width, beam deflection.*

УДК 69.057 **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-10-18**

ТЕНДЕНЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ДОМОСТРОЕНИЯ В МИРОВОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПРАКТИКЕ ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

В.Ю. ГУРИНОВИЧ[1], д-р техн. наук, проф. С.Н. ЛЕОНОВИЧ[2], Д.А. ПОЗДНЯКОВ[3]
([1], [2]Белорусский национальный технический университет, Минск,
[3]Республиканское унитарное предприятие «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С.С.», Минск)
[1]https://orcid.org/0000-0001-8773-6149, [2]https://orcid.org/0000-0002-4026-820X,
[3]https://orcid.org/0000-0003-1247-5655, [1]gurinovich@bntu.by, [2]sleonovich@mail.ru, [3]pozddzm@tut.by

Приоритетной задачей государственной политики в области жилищного строительства в Республике Беларусь является наращивание объемов возведения жилья и снижение его стоимости. Критериям возведения жилья в кратчайшие сроки, снижения его стоимости и обеспечения населения доступным жильем в большей степени соответствует индустриальное строительство, широкие возможности которого проверены временем. В статье представлены результаты исследований распределения объемов жилищного строительства в зависимости от технологии возведения зданий в Республике Беларусь и приведено сравнение объемов строительства зданий в индустриальном исполнении в мировой практике жилищного строительства. Определены актуальные направления и тенденции научных исследований в области индустриального строительства, структура цитирования публикаций, ключевые исследователи, страны и институты по вовлеченности в исследования в данной области. Результаты исследований показали, что индустриальное строительство является одним из наиболее интенсивно развивающихся и перспективных направлений научных исследований в области строительства и строительных технологий в мире.

Ключевые слова: *жилищное строительство, индустриальное строительство, предприятия индустриального домостроения, производство сборных железобетонных конструкций, наукометрический анализ, библиографический поиск, сборные железобетонные конструкции.*

Введение. В Республике Беларусь развитие жилищного строительства определено государственной политикой, ориентированной на наращивание объемов строительства жилья с минимальными затратами на его возведение, а также развитие индивидуального жилищного строительства. Среди основных задач государственной политики в области жилищного строительства можно отметить планомерное повышение обеспеченности населения жильем и доведение этого показателя до 27,3 кв. метров на человека при установленной средней стоимости 1 кв. метра в пределах эквивалентной 500 долл. США, обеспечение строительства не менее 40% индивидуальных жилых домов коттеджного типа от общего объема строительства жилья, в том числе повышение качества возводимого жилья с соблюдением нормативных сроков строительства.

С 2016 года объем жилищного строительства в Беларуси установился в среднем на уровне 4 млн. кв. метров в год. На рисунке 1 представлена динамика изменения объемов возведения жилья в республике в период с 2005 по 2020 гг.

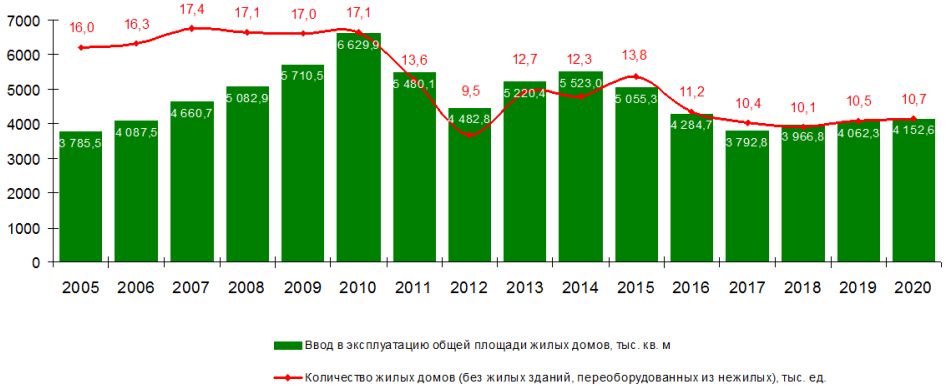


Рисунок 1. – Общий объем ввода в эксплуатацию жилых домов

По объемам жилищного строительства Республика Беларусь среди стран Европы находится на достаточно высоком 9 месте с показателем 146 квартир на каждые 10 тыс. населения. При этом лидером в пересчете на численность населения страны с показателем 227 квартир на каждые 10 тыс. населения является Российская Федерация. Объемы жилищного строительства в странах Европейского региона представлены на рисунке 2.

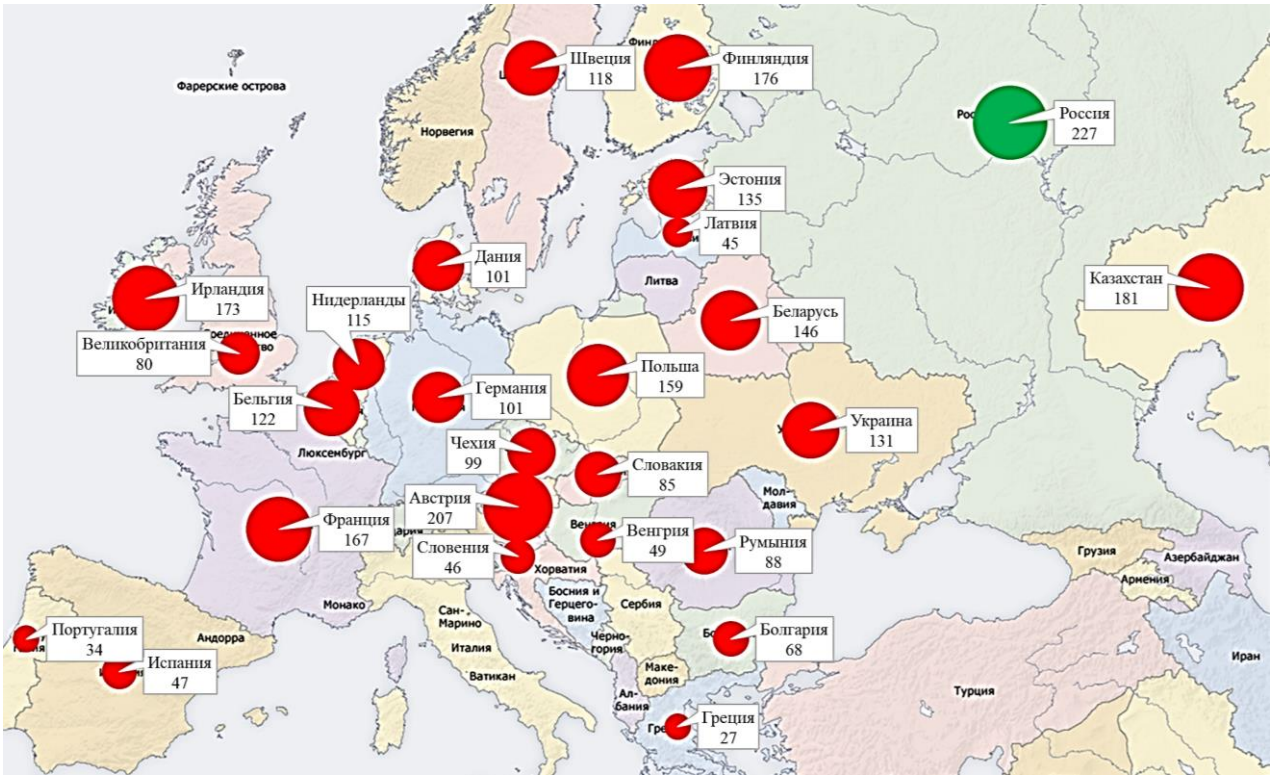


Рисунок 2. – Объемы жилищного строительства за 2017–2019 гг. на 10 тыс. населения в Европейских странах

В установившейся строительной практике жилые здания в зависимости от применяемых материалов и технологии возведения условно можно разделить на 3 основные группы:

– традиционные – здания со стенами из кирпича, камня, мелких блоков, деревянных брусьев, доля которых в общем объеме жилищного строительства за период 2016–2020 гг. составляет в среднем 53%;

– индустриальные из сборных железобетонных изделий – здания с различной степенью сборности: крупноблочные, каркасные, каркасно-панельные, крупнопанельные, блочнопанельные, объемноблочные, доля которых за период 2016–2020 гг. составляет в среднем 42%;

– монолитные и сборно-монолитные – здания, возводимые с применением индустриальных типов опалубки и частичным применением индустриальных конструкций и деталей, доля которых за период 2016–2020 гг. находится в среднем на уровне 5%.

Распределение строительства жилья в зависимости от технологии возведения зданий в период с 2010 по 2020 гг. в республике представлено на рисунке 3.

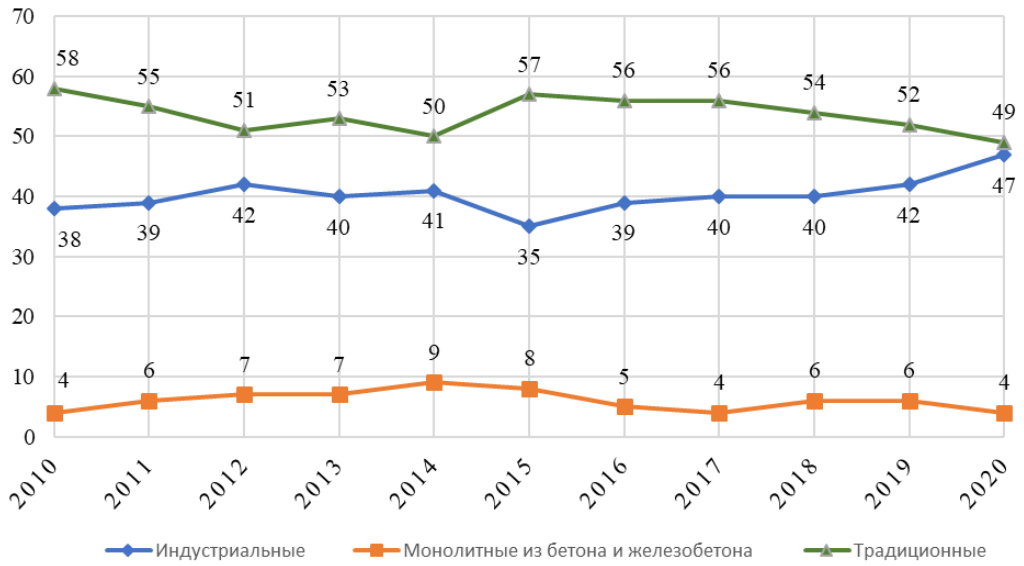


Рисунок 3. – Строительство жилых домов в зависимости от технологии возведения

Представленные на графике данные демонстрируют увеличение возведения жилья в индустриальном исполнении, начиная с 2015 года, что в свою очередь свидетельствует о росте интереса со стороны застройщиков и строительных компаний к индустриальному методу строительства в отечественной практике жилищного строительства.

Рост возведения жилья в индустриальном исполнении прежде всего можно обосновать основными преимуществами индустриального строительства в сравнении с альтернативными методами возведения жилых зданий, среди которых следует выделить: высокое качество строительно-монтажных работ, сокращение продолжительности и стоимости строительства, снижение трудовых и материальных ресурсозатрат, повышение безопасности строительства, а также экологичность строительства, которая обеспечивается сокращением отходов [1–6].

В свою очередь имеется ряд факторов, сдерживающих интенсивное развитие индустриального строительства, которые прежде всего обусловлены ограниченным архитектурным и конструктивно-планировочным разнообразием зданий в индустриальном исполнении, сложностью доставки крупногабаритных конструкций на стройплощадки в городских условиях и на дальние расстояния, полной зависимостью темпов строительства от производительности и эффективности организации производства предприятий индустриального домостроения. Следует также отметить, что в зарубежной строительной практике по данным [7–9] на развитие индустриального строительства в отдельных регионах оказывают влияние климатические условия, определяющие приоритет выбора альтернативных методов строительства.

Анализ публикационной активности результатов исследований показал, что индустриальное строительство в последнее время привлекает все больше внимания ученых и практикующих специалистов и является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в мировой практике исследований в области строительства и строительных технологий [10–12]. Теоретический анализ литературы в международной библиографической базе Scopus показал значительный рост количества публикаций по данной тематике, начиная с 2015 года [13], что подтверждается данными, представленными на рисунке 4.

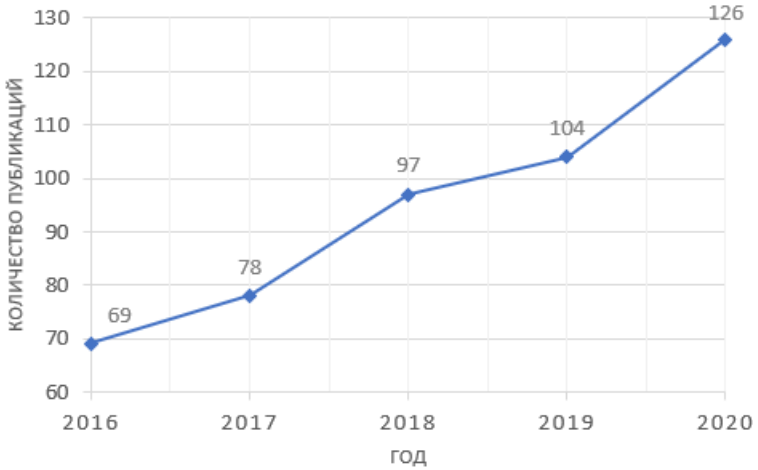


Рисунок 4. – Показатели роста публикаций в области индустриального строительства в реферативной базе Scopus за период 2016–2020 гг.

Интенсивный рост публикационной активности результатов исследований в области индустриального строительства, в том числе рост возведения жилых зданий в индустриальном исполнении в отечественной строительной практике, определили цель и задачи проведенных исследований. На основании вышеизложенного целью проведенных исследований стало изучение тенденций и ведущих направлений научных исследований в области индустриального строительства, структуры цитирования публикаций, ключевых исследователей, стран и институтов по вовлеченности в исследования в области индустриального строительства.

Планирование проведения исследований. Изучение направлений и тенденций научных исследований в области индустриального строительства было проведено с помощью наукометрического анализа. Наукометрический анализ позиционируется как основной инструмент изучения отдельных направлений науки, сетей научных коммуникаций, средств оценки результативности научных исследований [14] и основан на применении наукометрических показателей, позволяющих сделать характеристики публикаций, авторов и прочих объектов измеримыми, сравнимыми и пригодными для анализа.

В качестве основных наукометрических показателей были выбраны метрики, определяющие производительность, влиятельность, значимость исследований и вовлеченность в исследования в анализируемой предметной области.

Исследования были проведены на базе аналитической системы SciVal международной библиографической базы Scopus в предметных категориях, содержащих публикации в области индустриального строительства, и разделены на отдельные этапы. На первом этапе был проведен библиографический поиск научной лите-

ратуры в области индустриального домостроения в трех тематических кластерах аналитической системы SciVal, включающих более 250 отдельных предметных категорий в области строительства. На втором этапе проводились анализ тематик, цитирования публикаций, стран и институтов по вовлеченности в исследования в области индустриального строительства и оценка результативности научных исследований в отобранных предметных категориях. На завершающем этапе проведено обсуждение результатов наукометрического анализа, закономерностей и тенденций в области индустриального домостроения.

Анализ развития индустриального строительства в зарубежной практике возведения жилья. Возведение зданий и сооружений из сборных железобетонных конструкций является одним из основных методов строительства во многих Европейских странах и в последнее время интенсивно развивается в азиатском регионе (Китай, Малайзия, Индия, Южная Корея, Иран и др.). При этом индустриальное строительство в зарубежной практике рассматривается как инструмент оптимизации строительства за счет развития производства строительных изделий вне строительной площадки [7; 15], а сборный железобетон – как один из методов строительства, использующих принципы индустриализации в строительном процессе. По данным [7] средняя доля зданий из сборного железобетона в странах Европейского Союза составляет 20–25%, в странах Северной Европы она достигает 40–50%. Объем строительства из сборных конструкций в Китае за последнее десятилетие достиг показателя более 30% в общем объеме строительного рынка страны [8]. Общий объем рынка индустриального домостроения в мире по данным[1] представлен на рисунке 5.

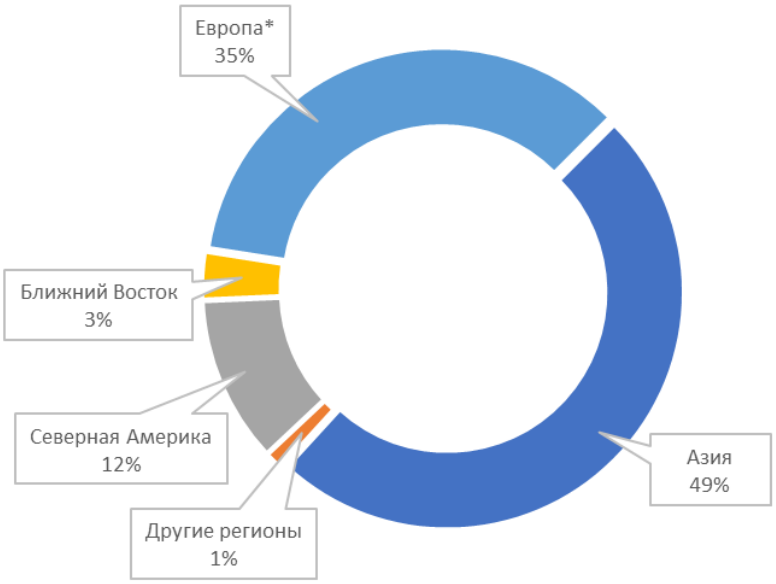


Рисунок 5. – Распределение объема рынка индустриального строительства

Примечание. * – включая Российскую Федерацию.

Среди лидеров современного индустриального строительства выделяются скандинавские страны, в частности, Швеция, а по уровню автоматизации и роботизации промышленного изготовления строительных конструкций мировое лидерство прочно удерживает Япония. Производительность японских предприятий индустриального строительства в 7 раз превышает соответствующие показатели европейских производителей [16].

Несмотря на успехи индустриализации жилищного строительства, в большинстве экономически развитых стран до сих пор превалируют методы строительства без применения сборных железобетонных конструкций. Так, в США и Турции доля зданий из сборного железобетона составляет всего 6% и 2% соответственно. Анализ результатов исследований развития индустриального домостроения в США и Турции позволил обосновать столь низкие показатели возведения жилья в индустриальном исполнении прежде всего отсутствием опыта проектирования зданий из сборных железобетонных конструкций, отсутствием квалифицированных рабочих и специалистов, низкой сейсмоустойчивостью зданий из сборного железобетона [7; 9].

Обзор тенденций научных исследований в области индустриального строительства. Проведенный анализ 30 рейтинговых предметных категорий по количеству публикаций и показателю актуальности тем в области индустриального домостроения в аналитической системе SciVal международной библиографической базы Scopus определил 8 основных направлений исследований в области строительства за период с 2016 по 2020 гг. (рисунок 6).

[1] Research and Markets: The Global Prefabricated Buildings Market – Key Trends and Opportunities to 2017 // Business Wire. URL: https://www.businesswire.com/news/home/20140123005885/en/Research-and-Markets-The-Global-Prefabricated-Buildings-Market---Key-Trends-and-Opportunities-to-2017.

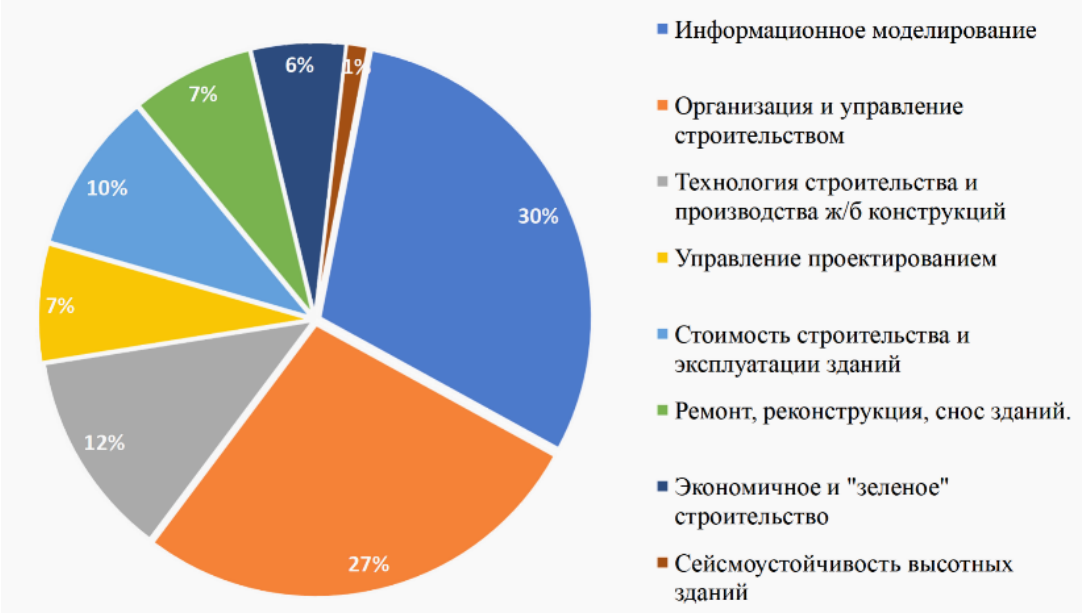


Рисунок 6. – Основные направления исследований в области строительства

Анализ данных, приведенных на рисунке 6, показал, что наиболее востребованными тематиками исследований в области индустриального строительства являются информационное моделирование, организация и управление строительством, технология строительства и производство сборных железобетонных изделий, в том числе надежность, экономичность, экологичность индустриального домостроения и пр. При этом следует отметить, что в исследованиях преобладают темы, ориентированные на изучение архитектурных и конструктивных решений зданий, железобетонных конструкций заводского изготовления и их свойств, организации строительства в условиях строительной площадки и пр., а тематикам в области организации производства железобетонных изделий, управления производством, исследований технологий производства изделий в заводских условиях уделяется меньшее внимание. Актуальность развития исследований в перечисленных направлениях подтверждается результатами исследований, представленных в [8; 17; 18], которые показали, что эффективная организация производства сборных железобетонных изделий является основным фактором, обеспечивающим достижение всех основные преимуществ индустриального домостроения.

Анализ наукометрических показателей и обсуждение полученных результатов исследований. По данным [1; 10; 12] важную роль при проведении наукометрического анализа играет определение ведущих стран и учреждений по вовлеченности в исследования анализируемой области. В соответствии с этим для проведения исследований были отобраны и распределены по анализируемым показателям в области индустриального строительства 20 стран и 20 учреждений, показатели научной результативности которых за период 2016–2020 гг. приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1. – Ведущие страны по результативности исследований

№ п/п	Страна/Регион		Количество публикаций	Количество просмотров	Нормализированный индекс цитирования	Количество цитирований
1	2		3	4	5	6
1		Китай	120	7796	1,61	1626
2		Австралия	69	6815	2,01	1245
3		Малайзия	58	3943	0,83	254
4		Великобритания	53	3922	1,15	521
5		США	40	3095	2,32	544
6		Гонконг	33	3990	3,06	786
7		Индия	24	835	0,31	35
8		Канада	18	1050	1,16	254
9		Швеция	18	852	1,47	89
10		Иран	13	716	1,89	102

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
11		Германия	11	537	0,33	32
12		Российская Федерация	11	174	0,49	6
13		Сингапур	9	1410	3,3	218
14		Словакия	8	480	1,03	23
15		Египет	7	330	0,54	45
16		Индонезия	7	263	0,11	4
17		Новая Зеландия	7	378	1,42	31
18		Южная Корея	7	588	1,41	65
19		Чешская Республика	6	224	0,69	18
20		Италия	6	520	0,87	41

низший наивысшее значение метрики

Таблица 2. – Ведущие учреждения по результативности исследований

№ п/п	Учреждение		Количество публикаций	Количество просмотров	Нормализированный индекс цитирования	Количество цитирований
1		Харбинский технологический институт	25	756	0,66	90
2		Гонконгский политехнический университет	25	2652	2,58	572
3		Мельбурнский университет	16	1734	2,17	407
4		Университет Сайнс	14	1109	0,82	74
5		Чунцинский университет	12	1355	2,48	360
6		Университет Технологии МАРА	12	764	0,35	22
7		Технологический университет Лулео	11	436	1,34	38
8		Университет Кертин	10	1056	2,71	216
9		Университет Нового Южного Уэльса	10	665	0,98	105
10		Университет Тун Хусейн Онн	9	699	0,79	40
11		Университет Альберты	8	289	1,46	28
12		Университет Утара	8	463	0,23	18
13		Университет Западного Сиднея	8	553	1,84	63
14		Технический университет Кошице	7	370	0,84	21
15		Университет Цинхуа	7	616	4,22	181
16		Министерство образования Китая	6	269	0,7	22
17		Национальный университет Сингапура	6	1323	4,96	218
18		Технологический университета Квинсленда	6	767	2,15	86
19		Королевский Мельбурнский технологический институт	6	792	3,38	284
20		Ратгерский университет Нью-Джерси	6	872	4,1	200

низший наивысшее значение метрики

Анализ данных, представленных в таблицах, показал общее лидерство Китая по количеству публикаций, просмотров и цитирований статей. Также следует отметить, что в топ-20 учреждений по количеству публикаций вошло 4 китайских учреждения. В свою очередь приведенные количественные показатели отражают только

публикационную активность и интерес к анализируемым публикациям, но не отражают значимости и актуальности исследований в рамках определенной области исследований в сравнении с другими областями исследований в мире. Одним из показателей, определяющих научный уровень и востребованность публикаций в исследуемой предметной области, является нормализованный по области показатель цитирования публикаций, и если он ниже значения 1,0, то это демонстрирует, что публикации цитируются и востребованы ниже среднего мирового уровня.

По нормализированному индексу цитирования Китай занимает только 6 место. При этом для Министерства образования и Харбинского технологического института показатель нормализированного индекса цитирования оказался ниже среднего мирового уровня на 30% и 34% и составляет 0,7 и 0,66 соответственно. Лидерами среди стран по значимости и востребованности публикаций результатов исследований в области индустриального строительства являются Сингапур, Гонконг и Австралия, а среди учреждений – Национальный университет Сингапура (Сингапур), университет Цинхуа (Китай) и Ратгерский университет (США), уровень цитирования публикаций которых в 4 раза выше среднего мирового.

Интенсивное развитие индустриального домостроения в Китае обосновано государственной политикой в области экологической безопасности, в том числе требованиями сокращения вредных выбросов в строительной промышленности и внедрения экологичных строительных технологий. Данное утверждение подтверждается результатами анализа тематик публикаций, который показал, что ведущим направлением исследований в Китае является изучение воздействия развития индустриального домостроения на окружающую среду.

Высокие рейтинговые позиции Великобритании, Австралии, Гонконга и Малайзии прежде всего можно обосновать государственной политикой развития высокотехнологичных методов строительства в этих странах. В Великобритании разработаны программы поддержки развития и финансирования мероприятий, направленных на удовлетворение растущего спроса в доступном жилье и модернизацию технологий строительства с низким качеством и низкой производительностью на высокотехнологичные методы строительства, одним из которых является внеплощадочное строительство (OSM). В Малайзии развитию индустриального домостроения способствовала принятая еще в 2003 году Дорожная карта, направленная на обеспечение создания индустриализированного строительного сектора. В том числе развитие индустриального домостроения среди застройщиков в Малайзии мотивируется освобождением от уплаты строительных налогов при строительстве зданий с применением сборных конструкций заводского производства (IBS) в объеме более 50% [11].

В мире наиболее рейтинговыми по нормализированному индексу цитирования являются публикации в области исследований ресурсосбережения и экологичности индустриального строительства на примере строительной практики Китая [19], организации, оптимизации и моделирования цепочки поставок железобетонных изделий «предприятие – строительная площадка» [20], анализа затрат и определения направлений снижения стоимости индустриального домостроения [21]. Показатель нормализированного по области индекса цитирования данных публикаций более 10.

Среди публикаций с наибольшим количеством просмотров выделяются работы по моделированию процессов индустриального домостроения [22], оптимизации индустриального домостроения путем разработки инновационных решений монтажных соединений и организации монтажа конструкций[2], исследованию тенденций развития индустриального домостроения и выявления проблемных вопросов развития индустриального домостроения в США[3], нормализированный по области индекс просмотра публикаций которых составил 22,63; 15,25 и 13,85 соответственно.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Государственная политика в области жилищного строительства в части строительства доступного жилья, обеспечения прогнозных показателей средней стоимости 1 кв. метра жилья и объемов строительства способствует развитию в Республике Беларусь индустриального строительства как основного метода возведения жилья с минимальными затратами и в кратчайшие сроки. Обзор литературы показал, что в ряде стран (Китай, Великобритания, Австралия, Малайзия и др.) развитие индустриального домостроения также определяется государственной политикой развития высокотехнологичных, экологичных и экономичных методов строительства.

2. Индустриальное строительство в последнее время является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в мировой практике строительства. Средняя доля зданий из сборного железобетона в странах Европейского Союза составляет 20–25%, в странах Северной Европы она достигает 40–50%, в Китае – более 30%. Проведенный анализ объемов жилищного строительства в Европейских странах показал высокий уровень возведения жилья в Республике Беларусь, при этом в отечественной практике жилищного строительства доля зданий, возводимых в индустриальном исполнении, составляет 42%.

---

[2] Liew J., Richard Y. Innovation in modular building construction // 9th International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS 2018), Hong Kong, 5–7 December 2018. URL: https://www.scopus.com/record/display.url?eid=2-s2.0-85084950376&origin=resultslist.

[3] Grosskopf K.R., Elliott J.W., Killingsworth J.E. Offsite construction – U.S. market trends in prefabrication. Challenges for Technology Innovation: An Agenda for the Future // International Conference on Sustainable Smart Manufacturing (S2M), Lisbon, 20–22 October 2016. – P. 393–398. URL: https://experts.nebraska.edu/en/publications/offsite-constructionus-market-trends-in-prefabrication.

3. Установлено, что основными тематиками исследований в области индустриального домостроения являются информационное моделирование, организация и управление строительством, технология строительства и производство сборных железобетонных изделий, а тематикам в области организации производства железобетонных изделий, управления производством, исследований технологий производства изделий в заводских условиях уделяется меньшее внимание. При этом эффективная организация производства сборных железобетонных изделий является основным фактором, обеспечивающим достижение всех основные преимуществ индустриального домостроения, что в свою очередь определяет актуальность и важность исследований в данных направлениях.

Проведенный наукометрический анализ установил рост интереса к исследованиям в области индустриального домостроения, что подтверждается ежегодным увеличением количества публикаций в данной области. Но несмотря на общемировой рост исследований в области индустриального домостроения, по результатам анализа вовлеченности стран и организаций определено, что в Республике Беларусь исследования в данном направлении ведутся недостаточно активно, хотя и наблюдаются высокие показатели возведения зданий в индустриальном исполнении.

ЛИТЕРАТУРА

1. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China / Cao X., X. Li, Y. Zhu et al. // Journal of Cleaner Production. – 2015. – Vol. 109. – P. 131–143.
2. Precast concrete value engineering accommodates difficult sites / P. Hamill, C. Bechara, M. Bertolini et al. // PCI Journal. – 2006. – Vol. 51, № 4. – P. 2–25.
3. Case study-based challenges of quality concrete finishing for architecturally complex structures / J.D. Manrique, M.A. Hussein, A. Telyas et al. // Journal of Construction Engineering and Management. – 2007. – Vol. 133, № 3. – P. 208–216.
4. Towards adoption of prefabrication in construction / V.W.Y. Tam, C.M. Tam, S.X. Zeng et al. // Building and Environment. – 2007. – Vol. 42, № 10. – P. 3642–3654.
5. VanGeem M. Achieving sustainability with precast concrete // PCI Journal. – 2006. – Vol. 51, № 1. – P. 42–61.
6. Application of Sustainable Prefabricated Wall Technology for Energy Efficient Social Housing / R. Chippagiri, H.R. Gavali, R.V. Ralegaonkar et al. // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, № 3. – P. 1195.
7. Polat, G. Precast concrete systems in developing vs. industrialized countries // Journal of Civil Engineering and Management. – 2010. – Vol. 16, № 1. – P. 85–94.
8. Wang Z., Hu H., Gong J. Framework for modeling operational uncertainty to optimize offsite production scheduling of precast components // Automation in Construction. – 2018. – Vol. 86. – P. 69–80.
9. Perceptions of offsite construction in the United States: An investigation of current practices / M. Razkenari, A. Fenner, A. Shojaei et al. // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 29. – P. 101138.
10. A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings [Электронный ресурс] / L. Wenhui, Z. Hong, W. Qian et al. // Advances in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 2021. URL: https://www.hindawi.com/journals/ace/2021/8869315 (дата обращения 2021-02-18).
11. Azman M.N.A., Ahamad M.S.S., Wan Hussin W.M.A. Comparative Study on Prefabrication Construction Process // International Surveying Research Journal. – 2012. – Vol. 2, № 1. – P. 45–58.
12. Critical evaluation of off-site construction research: A Scientometric analysis / M.R. Hosseini, I. Martek, E.K. Zavadskas et al. // Automation in Construction. – 2018. – Vol. 87. – P. 235–247.
13. Гуринович В.Ю. Комплексное исследование развития индустриального домостроения // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 5. – С. 397–409.
14. Руководство по наукометрии: индикаторы развития науки и технологии: моногр. / М.А. Акоев, В.А. Маркусова, О.В. Москалева и др. – Екатеринбург: Урал. ун-т, 2014. – 250 с.
15. Alinaitwe H.M., Mwakali J.A., Hansson B. Assessing the degree of industrialisation in construction – A case of Uganda // Journal of Civil Engineering and Management. – 2006. – Vol. 12, № 3. – P. 221–229.
16. Vogler A. The House as a Product. – Amsterdam: IOS Press, 2015. – 186 p.
17. Kim T., Kim Y.W., Cho H. Dynamic production scheduling model under due date uncertainty in precast concrete construction // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 257. – P. 120527.
18. Research on Lean Planning and Optimization for Precast Component Production Based on Discrete Event Simulation [Электронный ресурс] / Z. Yuan, Y. Qiao, Y. Guo et al. // Advances in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 2020. URL: https://www.hindawi.com/journals/ace/2020/8814914/ (дата обращения 2021-02-18).
19. Unlocking the green opportunity for prefabricated buildings and construction in China / Y. Chang, X. Li, E. Masanet et al. // Resources, Conservation and Recycling. – 2018. – Vol. 139. – P. 259–261.
20. Precast supply chain management in off-site construction: a critical literature review / Z. Wang, H. Hu, J. Gong et al. // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 232. – P. 1204–1217.
21. Barriers to promoting prefabricated construction in China: A cost-benefit analysis / J. Hong, G.Q. Shen, Z. Li et al. // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 172. – P. 649–660.
22. Goh M, Goh Y.M. Lean production theory-based simulation of modular construction processes // Automation in Construction. – 2019. – Vol. 101. – P. 227–244.

REFERENCES

1. Cao, X., Li, X., Zhu, Y. & Zhang, Z.A. (2015). Comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China. *Journal of Cleaner Production, 109,* 131–143. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.120.
2. Hamill, P., Bechara, C., Bertolini, M., Wilden, H. & Biebighauser, M. (2006). Precast concrete value engineering accommodates difficult sites. *PCI Journal, 51 (4),* 2–25. DOI: 10.15554/pcij.07012006.18.40.

3. Manrique, J.D, Hussein, M.A., Telyas, A. & Funston, G. (2007). Case study-based challenges of quality concrete finishing for architecturally complex structures. *Journal of Construction Engineering and Management, 133 (3),* 208–216. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:3(208).
4. Tam, V.W.Y., Tam, C.M., Zeng, S.X. & Ng, W.C.Y. (2007). Towards adoption of prefabrication in construction. *Building and Environment, 42 (10),* 3642–3654. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.10.003.
5. VanGeem, M. (2006). Achieving sustainability with precast concrete. *PCI Journal, 51 (1),* 42–61. DOI: 10.15554/pcij.01012006.42.61.
6. Chippagiri, R., Gavali, H.R., Ralegaonkar, R.V., Riley, M., Shaw, A. & Bras, A. (2021). Application of Sustainable Prefabricated Wall Technology for Energy Efficient Social Housing. *Sustainability, 13 (3),* 1195. DOI: 10.3390/su13031195.
7. Polat, G. (2010). Precast concrete systems in developing vs. industrialized countries. *Journal of Civil Engineering and Management, 16 (1),* 85–94. DOI: 10.3846/jcem.2010.08.
8. Wang, Z., Hu, H. & Gong, J. (2018). Framework for modeling operational uncertainty to optimize offsite production scheduling of precast components. *Automation in Construction, 86,* 69–80. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.026.
9. Razkenari, M., Fenner, A., Shojaei, A., Hakim, H. & Kibert, C. (2020). Perceptions of offsite construction in the United States: An investigation of current practices. *Journal of Building Engineering, 29,* 101138. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101138.
10. Wenhui, L., Hong, Z., Qian, W., Tianran, H. & Hong, X. (2021). A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings. *Advances in Civil Engineering, 2021*. DOI: 10.1155/2021/8869315.
11. Azman, M.N.A., Ahamad, M.S.S. & Wan Hussin, W.M.A. (2012). Comparative Study on Prefabrication Construction Process. *International Surveying Research Journal, 2 (1),* 45–58. URL: https://www.researchgate.net/publication/260202475.
12. Hosseini, M.R., Martek, I., Zavadskas, E.K., Aibinu, A.A., Arashpour, M. & Chileshe, N. (2018). Critical evaluation of off-site construction research: A Scientometric analysis. *Automation in Construction, 87,* 235–247. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.002.
13. Gurinovich, V.Yu. (2022). Kompleksnoe issledovanie razvitiya industrial'nogo domostroeniya [Comprehensive Study of Development of Prefabricated Construction]. *Nauka i tekhnika [Science and Technique], 21 (5),* 397–409. (In Russ, abstr. in Engl.). DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-5-397-409.
14. Akoev, M.A., Markusova, V.A., Moskaleva, O.V. & Pislyakov, V.V. (2014). *Rukovodstvo po naukometrii: indikatory razvitiya nauki i tekhnologii: monogr. [Handbook for Scientometrics: Indicators of science and technology development]*. Ekaterinburg: Ural. un-t. (In Russ, abstr. in Engl.). URL: https://elar.urfu.ru/handle/10995/40130.
15. Alinaitwe, H.M. Mwakali, J.A., Hansson, B. (2006). Assessing the degree of industrialisation in construction – A case of Uganda. *Journal of Civil Engineering and Management, 12 (3),* 221–229. DOI: 10.3846/13923730.2006.9636396.
16. Vogler, A. (2015). *The House as a Product*. Amsterdam: IOS Press.
17. Kim, T., Kim, Y.W. & Cho H. (2020). Dynamic production scheduling model under due date uncertainty in precast concrete construction. *Journal of Cleaner Production, 257,* 120527. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120527.
18. Yuan, Z., Qiao, Y., Guo, Y., Wang, Y., Chen, C. & Wang W. (2020). Research on Lean Planning and Optimization for Precast Component Production Based on Discrete Event Simulation. *Advances in Civil Engineering, 2020*. DOI: 10.1155/2020/8814914.
19. Chang, Y., Li, X., Masanet, E., Zhang, L., Huang, Z. & Ries, R. (2018). Unlocking the green opportunity for prefabricated buildings and construction in China. *Resources Conservation and Recycling, 139,* 259–261. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.08.025.
20. Wang, Z., Hu, H., Gong, J., Ma, X. & Xiong, W. (2019). Precast supply chain management in off-site construction: a critical literature review *Journal of Cleaner Production, 232,* 1204–1217. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.229.
21. Hong, J., Shen, G.Q., Li, Z., Zhang, B. & Zhang, W. (2018). Barriers to promoting prefabricated construction in China: A cost-benefit analysis *Journal of Cleaner Production, 172,* 649–660. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.171.
22. Goh, M. & Goh, Y.M. (2019). Lean production theory-based simulation of modular construction processes. *Automation in Construction, 101,* 227–244. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.12.017.

Поступила 23.02.2023

TRENDS AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF PREFABRICATED CONSTRUCTION IN THE WORLD AND DOMESTIC PRACTICE OF CIVIL CONSTRUCTION

V. GURINOVICH[1], S. LEONOVICH[2], D. POZDNYAKOV[3]
([1], [2]Belarusian National Technical University, Minsk,
[3]RUE «Institute of Housing – NIPTIS named after S. Ataev», Minsk)

The main objective of the state policy in the sphere of civil construction in the Republic of Belarus is to increase the volume of civil construction and decrease its cost. The criteria of building in the shortest possible time, reducing its cost and providing the population with affordable housing is more consistent with the prefabricated construction, the wide possibilities of which are time-tested. In the article the results of studies of distribution of volumes of civil construction depending on the technology of erection of buildings in the Republic of Belarus are presented and the comparison of volumes of prefabricated construction in the world practice of housing construction is presented. The actual directions and tendencies of scientific research in the field of prefabricated construction, the structure of citation of publications, key researchers, countries and institutions by involvement in research in the field of prefabricated construction are determined. The results showed that prefabricated construction is one of the most intensively developing and promising areas of research in the field of construction and building technology in the world.

Keywords: *civil construction, prefabricated construction, precast construction plants, precast production, scientometric analysis, bibliographic search, precast reinforced concrete structures.*

УДК 666.972.5+624.012.45.042.5 **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-19-26**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ДОЛГОВЕЧНОГО БЕТОНА ДЛЯ МОРСКИХ ПОРТОВЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ МОРОЗНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В.В. МАЛЮК[1], канд. техн. наук, доц. В.Д. МАЛЮК[2],
д-р техн. наук, проф. С.Н. ЛЕОНОВИЧ[3], А.В. КОЛОДЕЙ[4]
([1], [2]ООО «Трансстрой-Тест», Южно-Сахалинск,
[3], [4]Белорусский национальный технический университет, Минск,
[3]Институт Циндао, Китай)
[1]mvv.77@mail.ru, [2]mvd46@bk.ru, [3]snleonovich@yandex.ru,
[4]zhuravskaya.alin@yandex.by

В настоящее время проектирование конструкций со сроком службы 50 лет в условиях морозного воздействия проводится на основе нормативных документов, которые рекомендуют требования к показателям качества бетона, его составу и материалам для его изготовления. В определенной степени – это предписывающий принцип, поскольку рекомендуемые требования, принятые во время проектирования, являются обязательными на этапе строительства. Уровень требований зависит от агрессивности среды и параметров температурных воздействий. В результате лабораторного подбора определяется рабочий составов бетона, на основании которого отрабатывается технология бетонных работ. Для обеспечения срока службы бетона 50 лет в агрессивной среде класса XF 4 при морозном воздействии рекомендовано применять следующие ограничения к составу и показателям качества бетона: водоцементное отношение (В/Ц) – не выше 0,45; расход цемента – не менее 340 кг/м^3; воздухововлечение – не менее 4%; класс прочности бетона – не менее В35; марка по морозостойкости – в зависимости от температуры воздуха зимой в районе строительства. Ряд ограничений установлен к качеству материалов для бетона (цемента, щебня, песка, воды) и показателям технологических свойств бетонной смеси.

Расчетных методов подбора состава требуемой морозостойкости не разработано. Поэтому состав бетона требуемой марки по морозостойкости определяется методом подбора. В связи с этим подбор состава бетона по морозостойкости представляет продолжительный, сложный и трудоемкий процесс, выполняемый специалистами-технологами высокого уровня. Расчетные методы прогноза долговечности разрабатываются для оптимизации проектных решений за счет учета реальных условий эксплуатации сооружений и применения материалов с показателями качества, достаточными для обеспечения требуемого срока службы конструкций в конкретных условиях эксплуатации. Разработка методов расчета долговечности бетона предопределяет необходимость исследовать эффективность технологических приемов, используемых при изготовлении конструкций, и граничные пределы требований к технологии бетона для обеспечения долговечности конструкций в условиях морозного воздействия.

Ключевые слова: *бетон, долговечность, морские портовые сооружения, транспортные сооружения, проектирование, технология, морозное воздействие.*

Введение. Состояние вопроса. Современный подход к проектированию бетонных конструкций по долговечности в условиях морозного воздействия основан на обязательном выполнении предписывающих требований. Рассмотрен методологический подход к проектированию долговечности для морских портовых и транспортных сооружений. На рисунке 1 представлена принципиальная схема методологии создания долговечных бетонов при морозном воздействии. В общем виде ее можно представить как систему, состоящую из подсистем, каждая из которых характеризуется критическими показатели. В настоящее время для этих показателей рекомендованы параметры, позволяющие обеспечить срок службы бетона 50–100 лет в различных агрессивных средах.

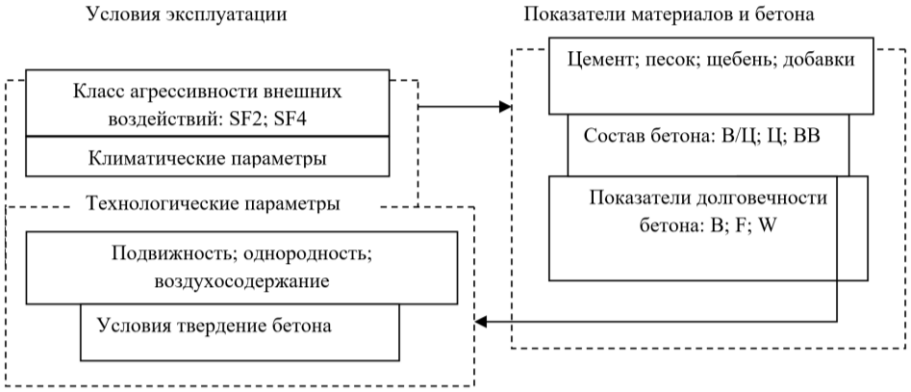


Рисунок 1. – Схема критических параметров для организации технологии бетонных работ в соответствии с нормативными требованиями

Опыт строительства и эксплуатации морских портовых сооружений показывает, что обоснованное назначение параметров на этапе проектирования долговечности и реализации этих параметров на этапе изготовления конструкций позволяет обеспечить безремонтный срок службы конструкций в агрессивных средах класса SF 4 не менее 50 лет. Наши исследования показали, что традиционные технологии позволяют обеспечить срок службы конструкциям не менее 100 лет при марке морозостойкости $F_2$50. Это показывает, что бетон, изготовленный по современным требованиям, имеет морозостойкость на порядок выше, чем это требуется для обеспечения долговечности.

Однако наблюдаемые случаи преждевременного разрушения конструкций вызывают необходимость исследовать причины этого несоответствия[1] [1–13]. Поэтому целесообразно установить, на каких технологических переделах возникают риск несоответствий и их причины.

Модель прогноза долговечности. Результаты исследований показали, что если принять в качестве определяющего критического параметра долговечности степень насыщения пор бетона S_{ACT}, модель прогноза долговечности бетона при морозном воздействии должна строиться на установлении условий сочетания факторов, при которых возникают условия критического водонасыщения S_{CR}. В этом случае основная цель проектирования бетона по долговечности в условиях морозного воздействия – обосновать назначение показателей бетона, которые за период службы в конкретных условиях эксплуатации конструкций исключат возможность критического водонасыщения пор бетона, т.е. обеспечить условие $S_{ACT} \leq S_{CR}$.

Результаты исследований дают основания считать, что долговечность бетона при морозном воздействии в преобладающих случаях определяется стойкостью к морозной нагрузке в первый зимний сезон. Долговечность бетона следует привязывать к условиям эксплуатации, поскольку критическая степень насыщения бетона S_{CR} зависит от морозной нагрузки. Поэтому для прогнозирования долговечности необходимо знать сочетание показателей S_{ACT} и P_F, при котором сохраняется условие $S_{ACT} \leq S_{CR}$, поскольку в этом случае появляются благоприятные условия для дальнейшего совершенствования структуры порового пространства, с точки зрения морозостойкости, за счет процессов гидратации цементного камня. Следовательно, долговечность бетона при морозном воздействии – это период сохранения в структуре бетона условия $S_{ACT} \leq S_{CR}$.

При условии $S_{ACT} > S_{CR}$ высокая вероятность образования в стенках пор микротрещин, появление которых в поровом пространстве создает новую структуру пор. Образование пор в виде микротрещин характеризует начало этапа деградации в двухстадийном процессе коррозии бетона при морозном воздействии. Это принципиально меняет не только поровое пространство, но и механизм коррозии бетона. Поэтому целесообразно рассматривать процессы коррозии бетона при морозном воздействии отдельно на стадии инициации и деградации. Продолжительность периода инициации характеризуется условием $S_{ACT} < S_{CR}$ и является показателем долговечности. Этап деградации характеризуется условием $S_{ACT} > S_{CR}$, а его продолжительность определяется уровнем эксплуатационной пригодности конструкции. Исходя из этого, срок службы бетона в конструкции следует прогнозировать из условия долговечности и эксплуатационной пригодности.

Проектирование бетона на принципах эксплуатационных характеристик предопределяет необходимость иметь модель прогноза долговечности с учетом реальных условий эксплуатации. Результаты проведенных исследований дают возможность представить концепцию, которую целесообразно использовать для построения модели долговечности бетона в условиях морозного воздействия.

Графики на рисунке 2 визуализируют сценарии кинетики насыщения бетона в период службы сооружения на примере эксплуатации сооружения К1. Срок службы сооружения К1 составляет 90 лет, и на рисунке 2

[1] Leonovich, S.N. The aggressive influence on the concrete and the modes to provide it's corrosion resistance // Materials Science and Restoration: Proc. 3-rd Intern. Colloq. – Esslingen, 1992. – Vol. 3. – P. 1443–1149.

Leonovich S.N., Shevchenko V.I. The structure of the concrete and it's durability // Materials Science and Restoration: Proc. 3-rd Intern. Colloq. – Esslingen, 1992. – Vol. 3. – P. 1652–1658.

ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 15 с.

Leonovich S.N. The influence of cyclic freezing and thawing on cracking of concrete // Durability and service life of bridge structures: Proc. of 2-nd Intern. Scien. Conf. – Poznan, 1994. – P. 163–166.

Leonovich S.N. Fracture Mechanics Parameters of Concrete: Test Methods Development and Harmonization of Standards // Concrete in The Service of Mankind: Intern. Congress. – Dundee, 1996.

Leonovich S.N. The Non-Destructive Diagnostic Methods of Concrete-Lined Tunnels // Proc. of World Tunnel Congress. – Wienna, 1997.

Leonovich S.N. The Influence of Structure of Concrete on Frost-Salt Resistance // Proc. of 13-th International Conference of Building Materials (13 IBAUSIL). – Weimar, 1997. – Vol. 2. – P. 263–268.

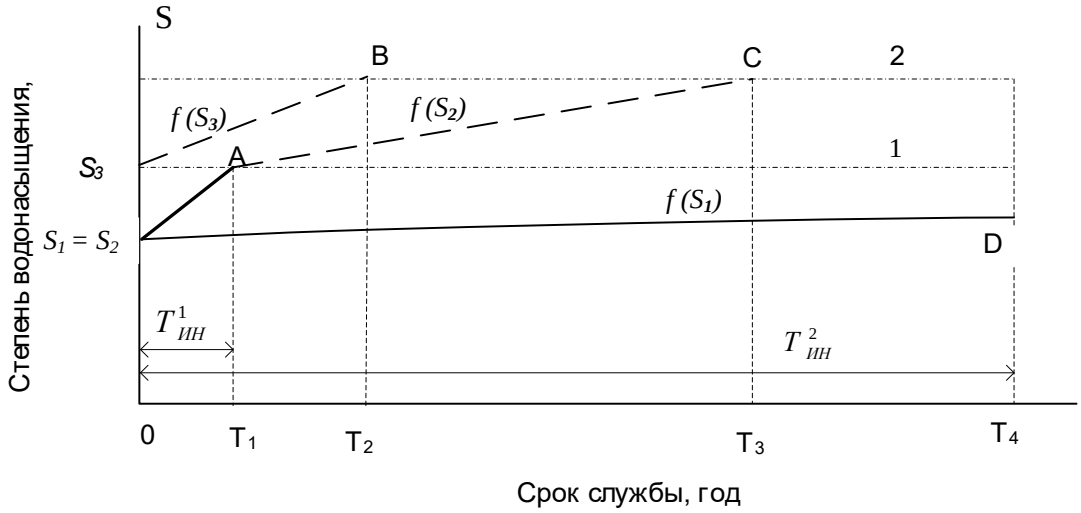
Leonovich S.N. Fracture Mechanism for Estimation of Freeze – Thaw Resistance of Concrete // 15 Internationale Baustofftagung, Germany, 24–27 September 2003. – Weimar, 2003.

Frost Resistance of High-Performance Selfstressed Concrete under Pure Frost Attack / S.N. Leonovich, B.M. Khroustaliev, W.F. Zverew et al. // Keep Concrete Attractive: Proc. of the fib Symposium. – Budapest, 2005. – C. 275–279.

Leonovich S.N., Al-Fakih O. Durability of self-stressed (expansive) concrete // Proc. of the fib Congress. – Naples, 2006.

Leonovich S.N., Snezkov D.Yu. Complex Method of Strength Estimation of the Monolithic Reinforced Concrete Structures // Concrete Structures – Stimulators of Development: Proc. of the fib Symposium Dubrovnik, 2007. – Zagreb, 2007. – P. 947–954.

он представлен отрезком 0-T_4. За этот период прочность бетона существенно возросла, что подтверждает обоснованность условия долговечности $S_{ACT} < S_{CR}$. Это условие отображает график $f(S_1)$ и характеризует кинетику водонасыщения S_{ACT} от морозной нагрузки $P_{F1} = f(t_F, N_{FT})$. Реальная нагрузка от внешних воздействий не оказала негативного влияния на прочностные характеристики бетона, что косвенно может характеризовать структуру основной массы бетона как долговечная, поэтому нет оснований полагать, что снижение прочности бетона будет происходить в дальнейший период эксплуатации. С практической точки зрения, бетон имеет беспредельную долговечность.



1 – предельный уровень долговечности (S_{CR});
2 – предельный уровень эксплуатационных характеристик;
$f(S_1)$; $f(S_3)$ – зависимость долговечности для условий эксплуатации $S^1_{ACT} = f(t_F, N_{FT})$;
$f(S_2)$ – зависимость долговечности для условий эксплуатации $S^2_{ACT} = f(t_F, T_F)$

Рисунок 2. – Схема сценариев долговечности бетона в зависимости от кинетики насыщения бетона S_{ACT} в зоне переменного уровня в зависимости от состава бетона и морозной нагрузки в период срока службы сооружения

Анализ лабораторных исследований. Лабораторные исследования показали, что повышение морозной нагрузки за счет понижения температуры замораживания принципиально изменяет процесс коррозии бетона. Несколько десятков циклов ПЗО при более низкой температуре замораживания приводят к полному разрушению бетона. Причина разрушения, очевидно, связана с тем, что уже при первом замораживании уровень морозной нагрузки привел к насыщению пор до критической степени, т.е. $S_{ACT} \geq S_{CR}$, а последующие циклы развивали деградацию структуры за счет микротрещинообразования. На рисунке 2 отрезок 0-T_1 характеризует начальный этап периода инициации ($T^1_{ИН}$), который определяет долговечность после первого зимнего сезона.

Причины разрушения бетона в первый зимний сезон. Сценарии водонасыщения и долговечности на графиках $f(S_2)$ и $f(S_3)$ объясняют возможные причины разрушения бетона в первый зимний сезон. Точки А и В на графиках рисунка 2 характеризуют переход процесса коррозии от стадии инициации в стадию деградации. Как видно (см. рисунок 2), бетоны одного состава $S_1 = S_2$ могут иметь разную долговечность, что обусловлено различием морозной нагрузки. Для сценария $f(S_2)$ после точки А срок службы определяется не долговечностью бетона, а эксплуатационной пригодностью. Несмотря на то, что ресурс долговечности бетона будет исчерпан после первого зимнего сезона, эксплуатационная пригодность конструкции может сохраняться длительное время. Поэтому периоды после точек А и В характеризуют не долговечность, а эксплуатационную пригодность конструкции. При условии, что после первого зимнего периода степень насыщения пор S_{ACT} не достигает критической степени насыщения S_{CR}, в дальнейшем за счет совершенствования структуры бетона степень ее насыщения не должна повышаться. Это должно являться основополагающим положением при проектировании долговечных бетонов в условиях морозного воздействия. График функции $f(S_1)$ иллюстрирует продолжительность долговечности для случая эксплуатации сооружения К1.

В течение первого зимнего периода может происходить внезапный отказ при морозной нагрузке $P_{F2} = f(t_F, T_F)$ в условиях обледенения, который проявляется в виде отслоения бетона толщиной несколько сантиметров, т.е. приводит к разрушению защитного слоя в железобетонных конструкциях. Наиболее актуально это для железобетонных конструкций, поскольку дальнейший процесс развития коррозии конструкции будет зависеть не только от уровня морозной нагрузки и морозостойкости бетона, но и от интенсивности коррозии арматуры. Следовательно, срок службы конструкций в морских портовых и транспортных сооружениях можно рассматривать

из условия долговечности и условия эксплуатационной пригодности. Поэтому методы проектирования и прогнозирования должны строиться с учетом двухстадийности процесса коррозии при морозном воздействии. Разделение процесса коррозии бетона при морозном воздействии на две стадии обусловлено тем, что, исходя из современных теоретических положений, на стадии инициации и деградации преобладают различные физические процессы.

Полученные результаты дают основания считать:

1) модель срока службы конструкции по долговечности должна строиться на основе критерия $S_{ACT} < S_{CR}$;

2) модель срока службы конструкции по эксплуатационной пригодности должна строиться на кинетике деградации структуры бетона, которая проявляется в снижении прочности R или в скорости разрушения бетона χ.

Исходя из теории вероятности отказа и срока службы, простейшая модель для описания события «отказа» включает переменную нагрузки S и переменную сопротивления R. В принципе переменные S и R могут быть любыми величинами и выражаться в любых единицах. Единственное требование – они должны быть соизмеримы. Отказ происходит при условии:

$$(\text{отказ}) = R < S. \quad (1)$$

При этом вероятность отказа P_f может происходить внезапно

$$P_f = P\ (R < S). \quad (2)$$

Либо в течение периода эксплуатации t, когда величины R и S изменяются, и отказ происходит при достижении условия (1) в момент времени τ, т.е. происходит деградационный отказ

$$P_f\,(t) = P\ [R\ (\tau) < S\ (\tau)]. \quad (3)$$

Полученные результаты показывают, что при эксплуатации морских портовых и транспортных сооружений может происходить как внезапный, так и деградационный отказ. Внезапный отказ проявляется после первого зимнего сезона.

Результаты исследований показывают, что для внезапного отказа необходимы следующие условия:

1) наличие критической степени водонасыщения пор перед началом замораживания бетона, т.е. наличия условия $S_{ACT} > S_{CR}$;

2) возможность перераспределения свободной воды в структуре бетона за счет миграции к зоне промерзания и образования локальных участков с критическим водонасыщением, т.е. переход водонасыщения от $S_{ACT} < S_{CR}$ к состоянию $S_{ACT} > S_{CR}$.

Полученные результаты показывают, что условие водонасыщения вида $S_{ACT} > S_{CR}$ возникает при структурной зрелости бетона $S_f < 1$, т.е. когда система капиллярных пор в цементном камне непрерывная или в структуре бетона имеется свободная вода, способная к перераспределению при температурном градиенте. Поэтому прогноз долговечности бетона делать не имеет смысла из-за высокой вероятности внезапного отказа. В этом случае на строительной площадке необходимо создать условия для формирования требуемой структурной зрелости бетона.

Результаты натурных исследований. Результаты натурных исследований показывают, что при условии $S_{ACT} < S_{CR}$ и недостаточной зрелости структуры бетона при длительном обледенении конструкций происходит перераспределение свободной воды к зоне промерзания. В результате происходит разрушение поверхностного слоя в виде корки. Характер и вид разрушения бетона дает основания полагать, что это связано с перераспределением влаги в его структуре и насыщением бетона до критической степени на границе его промерзания. Для внезапного отказа характерно как поверхностное, так и объемное разрушение после первого зимнего сезона.

При деградационном отказе повреждение от морозного воздействия первоначально, как правило, проявляется как уменьшение прочности в поверхностном слое. Повреждение структуры бетона может происходить в объеме материала без внешних признаков за счет микротрещинообразования. Развитие процесса деградации в последующие зимние сезоны будет зависеть как от значения морозной нагрузки (P_{F1}; P_{F2}), так и от уровня повреждения, которое структура бетона получила после первого зимнего сезона. Результаты исследований показывают, что после первого зимнего сезона может происходить как поверхностное, так и объемное разрушение бетона. В последнем случае происходит, например, полное разрушение бортовых камней, а в массивных конструкциях наблюдается разрушение поверхностного слоя на глубину до 50 мм. Поэтому модель прогноза эксплуатационной пригодности (далее – работоспособности) целесообразно рассматривать исходя из показателей, которые будут приниматься для оценки работоспособности конструкции. При отсутствии видимых разрушений модель прогноза целесообразно строить на основе концепции кинетики снижения прочности (R), а при наличии повреждений – на основе концепции скорости разрушения бетона (χ).

Этапы деградации бетона. Как видно, на стадии деградации бетона тоже целесообразно рассматривать два этапа:

1 этап – период потери прочности до уровня, при котором происходит разрушение поверхностного слоя бетона;

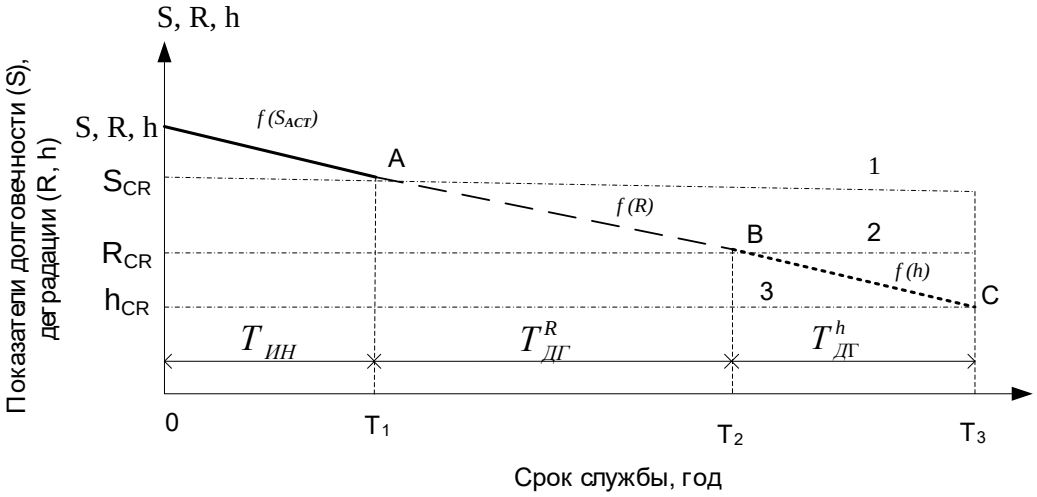
2 этап – период повреждения поверхностного слоя до критической величины. Критическая величина разрушения для железобетонных конструкций – это толщина защитного слоя, для бетонных конструкций – потеря эксплуатационной пригодности конструкции или ее элемента.

На рисунке 3 показана схема с периодами долговечности и работоспособности бетона в конструкции, в которой выделены три характерных этапа:

1) этап долговечности, который характеризуется периодом инициации ($T_{ИН}$);
2) этап снижения прочности на стадии деградации ($T^{R}_{ДГ}$);
3) этап разрушения поверхностного слоя ($T^{h}_{ДГ}$).

Безусловно, данная схема является лишь визуализацией продолжительности жизненного цикла бетона в период эксплуатации, однако на основании этого можно переходить к исследованию факторов, определяющих кинетику каждого из выделенных периодов: $T_{ИН}$; $T^{R}_{ДГ}$;$T^{h}_{ДГ}$. Это можно рассматривать как начальный этап разработки модели прогноза для проектирования конструкций по эксплуатационным характеристикам (работоспособности).

Стадию деградации целесообразно рассматривать как двухэтапный период, поскольку характеры повреждения бетона на этапах существенно различаются и по-разному влияют на эксплуатационную пригодность конструкции или сооружения. Степень влияния определяется функциональным назначением конструкции в сооружении.



1 – предельный уровень долговечности (S_{CR});
2 – предельный уровень эксплуатационных характеристик по прочности (*R*);
3 – предельный уровень эксплуатационных характеристик по разрушению (h);
кинетика водонасыщения на стадии инициации – *f(S)*;
кинетика снижения прочности на стадии деградации – *f(R)*;
кинетика разрушения бетона на стадии деградации – *f(h)*

Рисунок 3. – Схема этапов жизненного цикла бетона при эксплуатации в условиях морозного воздействия

Результаты проведенных исследований показывают, что при отсутствии стадии инициации кинетика развития деградационных процессов на этапах $T^{R}_{ДГ}$ и $T^{h}_{ДГ}$ в значительной степени будет зависеть от вида морозной нагрузки и среды замораживания бетона. Есть основания полагать, что наибольшая скорость развития деградационных процессов будет при нагрузке вида $P_{F1} = f(t_F, N_{FT})$. Первоначально при снижении прочности бетона в поверхностном слое поврежденный слой некоторое время будет выполнять защитные, но не конструктивные (расчетные) функции. Защитные функции поврежденного слоя при условии $S_{ACT} > S_{CR}$ заключаются в том, что он будет сдерживать продвижение границы промерзания и насыщения поверхностного слоя. За счет этого будет замедляться деградация последующих слоев бетона. Однако при достижении критической прочности R_{CR} возникают условия для разрушения бетона от механических воздействий на него. В конструкциях портовых сооружений это происходит от воздействия волн и плавающего льда, в конструкциях транспортных сооружений – от воздействия снегоуборочной техники при зимнем обслуживании автодорог.

Известен ряд математических моделей для прогноза снижения прочности бетона при морозном воздействии. Анализ этих моделей показывает, что их можно использовать для прогноза долговечности на этапах $T^{R}_{ДГ}$ и $T^{h}_{ДГ}$ стадии деградации, т.е. эти модели можно применять для прогноза продолжительности деградационного

периода. Проведенные исследования показывают, что в силу неоднородности бетона, разрушение его в конструкциях имеет локальный характер и протекает с непостоянной скоростью, поэтому необходима представительная выборка для статистической обработки.

Наблюдаемые локальные разрушения бетона различной степени повреждения в зоне прилива являются свидетельством того, что показатели бетона носят статистический характер и проявляются в зависимости от значения внешней нагрузки. Результаты исследований показывают, что значение внешней нагрузки может зависеть от конструктивного решения сооружения в зоне переменного уровня воды. На участке действия прилива разрушения имеют локальный характер и отличаются масштабом повреждения. Например, в зоне переменного уровня бетон конструкции сооружения К1 имеет разрушения по глубине от нескольких сантиметров до десятка сантиметров, а площадь повреждения от 0,3 до 2,0 м^2. Есть все основания полагать: причина этих разрушений связана с тем, что к началу морозного воздействия поры бетона на локальных участках разрушения уже имели критическую степень водонасыщения S_{CR} или критический уровень водонасыщения достигался после непродолжительного периода инициации. Схема долговечности и кинетики водонасыщения бетона (см. рисунок 3) показывает возможность классифицировать бетон как долговечный или недолговечный. Характер и объем разрушений, с одной стороны, позволяют устанавливать преобладающий механизм коррозии бетона, а с другой – позволяют делать объективное заключение о качественных показателях бетона, необходимых для обеспечения долговечности конструкций в конкретных условиях эксплуатации. При этом пробы бетона следует отбирать из неповрежденных участков конструкций, а влияние морозных воздействий оценивать кинетикой набора прочности бетона за период эксплуатации. На этой основе должны строиться прогнозные методы долговечности и проектирование бетона по эксплуатационным характеристикам. Это позволит определять:

– критические параметры технологии бетона для обеспечения требуемой долговечности конструкций;

– направления дальнейшего совершенствования технологии долговечного бетона в условиях морозного воздействия с учетом требований эксплуатационной пригодности сооружения.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Морозная нагрузка и механизм замораживания бетона предопределяют как кинетику насыщения пор, так и механизмы разрушения бетона. Даже в одной конструкции в процессе эксплуатации возможна трансформация механизмов разрушения и значимости факторов, определяющих работу этих механизмов.

2. При проектировании конструкций необходимо вести расчет по долговечности и работоспособности. Поэтому должны назначаться требования как к показателям качества бетона, так и к организации технологии бетонных работ, которая должна учитывать реальные условия строительной площадки и условия эксплуатации конструкций в сооружении.

3. Наши исследования показывают, что проектирование долговечности бетона в условиях морозного воздействия целесообразно проводить на основе принципов, принятых для технологии высокой морозостойкости, уделяя особое внимание этапам, которые связаны с формированием структурной зрелости бетона к началу морозного воздействия. Этот этап является определяющим в технологии морозостойкого бетона, поэтому во время проектирования следует особое внимание уделять требованиям не только к составам бетона, но и к условиям формирования его структуры до начала морозного воздействия в зависимости от состава бетона.

4. Проектирования бетона с требуемой долговечностью – это обоснование требований к составу бетона на основании реальных условий эксплуатации конструкций и к технологии бетона с учетом условий строительной площадки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонович С.Н. Долговечность центрифугированных железобетонных конструкций при циклическом замораживании и оттаивании // Бетон и железобетон. – 1988. – № 10. – С. 40–42.
2. Леонович С.Н., Иванов Ф.М., Зикеев Л.Н. Структура и морозостойкость центрифугированного бетона с добавками // Исследование и применение химических добавок. – 1988. – С. 59–66.
3. Леонович С.Н., Зикеев Л.Н. Неразрушающие методы контроля морозостойкости центрифугированного бетона // Коррозия бетона и арматуры в агрессивных средах. – 1990. – С. 69–77.
4. Разрушение бетона и его долговечность: моногр. / Е.А. Гузеев, С.Н. Леонович, А.Ф. Милованов и др. – Минск: Тыдзень, 1997. – 170 с.
5. Leonovich S.N. Calculation of Durability of Concrete Monuments using Fracture Mechanics // Internationale Zeitschrift für Baudenkmalpflege. – 1999. – №. 6. – P. 7.
6. Леонович С.Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения: моногр. – Минск: Тыдзень, 2000. – 266 с.
7. Леонович С.Н. Коррозия арматуры: общие подходы к расчету долговечности железобетонных конструкций // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Стр-во и архитектура. – 2002. – № 1. – С. 38–43.
8. Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения: моногр. // Под ред. С.Н. Леоновича. – Брест: БрГТУ, 2006. – 379 с.

9. Schneider U., Leonovich S. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical Concrete Properties at High Temperatures – Modeling and Applications. Part. 1: Introduction – General Presentation and Oth // Materials and Structures. – 2007. – Vol. 40, № 9. – P. 841–853.
10. Characterization of the Influence of Carbon Nanomaterials on the Mechanical Behavior of Cement Stone / J. Eberhardsteiner, S. Zhdanok, P. Samtsouw et al. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2011. – Vol. 84, № 4. – P. 753-760.
11. Зайцев Ю.В., Леонович С.Н., Шнайдер У. Структура, прочность и механика разрушения бетонов при двухосном и трехосном сжатии: моногр. – Минск: БНТУ, 2011. – 382 с.
12. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: моногр. в 2 ч. / С.Н. Леонович, Д.А. Литвиновский, О.Ю. Чернякевич и др. – Ч. 1. – Минск: БНТУ, 2016. – 390 с.
13. Гузеев Е.А., Леонович С.Н., Пирадов К.А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики: моногр. – Брест: БПИ, 1999. – С. 71–85.

REFERENCES

1. Leonovich, S.N. (1988). Dolgovechnost' tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh konstruktsii pri tsiklicheskom zamorazhivanii i ottaivanii. *Beton i zhelezobeton, (10),* 40–42. (In Russ.).
2. Leonovich, S.N., Ivanov, F.M. & Zikeev, L.N. (1988). Struktura i morozostoikost' tsentrifugirovannogo betona s dobavkami. *Issledovanie i primenenie khimicheskikh dobavok*, 59–66. (In Russ.).
3. Leonovich, S.N. & Zikeev, L.N. (1990). Nerazrushayushchie metody kontrolya morozostoikosti tsentrifugirovannogo betona. *Korroziya betona i armatury v agressivnykh sredakh*, 69–77. (In Russ.).
4. Guzeev, E.A., Leonovich, S.N., Milovanov, A.F., Piradov, K.A. & Seilanov, L.A. (1997). *Razrushenie betona i ego dolgovechnost': monogr.* Minsk: Tydzen'. (In Russ.).
5. Leonovich, S.N. (1999). Calculation of Durability of Concrete Monuments using Fracture Mechanics. *Internationale Zeitschrift für Baudenkmalpflege, (6),* 7.
6. Leonovich, S.N. (2000). *Treshchinostoikost' i dolgovechnost' betonnykh i zhelezobetonnykh elementov v terminakh silovykh i energeticheskikh kriteriev mekhaniki razrusheniya: monogr.* Minsk: Tydzen'. (In Russ.).
7. Leonovich, S.N. (2002). Korroziya armatury: obshchie podkhody k raschetu dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsii. *Vestn. Brest. gos. tekhn. un-ta. Str-vo i arkhitektura, (1),* 38–43. (In Russ.).
8. Leonovich, S.N. (Eds.) (2006). *Prochnost' konstruktsionnykh betonov pri tsiklicheskom zamorazhivanii-ottaivanii s pozitsii mekhaniki razrusheniya: monogr.* Brest: BrGTU. (In Russ.).
9. Schneider, U., Leonovich, S. (2007). Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical Concrete Properties at High Temperatures – Modeling and Applications. Part. 1: Introduction – General Presentation and Oth. *Materials and Structures, 40(9),* 841–853.
10. Eberhardsteiner, J., Zhdanok, S., Samtsouw, P., Khroustalev, B., Batsianouski, E. & Leonovich, S. (2011). Characterization of the Influence of Carbon Nanomaterials on the Mechanical Behavior of Cement Stone. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 84(4),* 753–760.
11. Zaitsev, Yu.V., Leonovich, S.N. & Shnaider, U. (2011). *Struktura, prochnost' i mekhanika razrusheniya betonov pri dvukhosnom i trekhosnom szhatii: monogr.* Minsk: BNTU. (In Russ.).
12. Leonovich, S.N., Litvinovskii, D.A., Chernyakevich, O.Yu. & Stepanova, A.V. (2016). *Prochnost', treshchinostoikost' i dolgovechnost' konstruktsionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeistviyakh: monogr. v 2 ch., Ch. 1* . Minsk: BNTU. (In Russ.).
13. Guzeev, E.A., Leonovich, S.N. & Piradov, K.A. (1999). *Mekhanika razrusheniya betona: voprosy teorii i praktiki: monogr.* Brest: BPI. (In Russ.).

Поступила 08.02.2023

DESIGN AND TECHNOLOGY OF DURABLE CONCRETE FOR SEA PORT AND TRANSPORT STRUCTURES IN CONDITIONS OF FROST EXPOSURE

V. MALYUK[1], V. MALYUK[2], S. LEONOVICH[3], A. KOLODEY[4]
([1, 2]LLC "Transstroy-Test", Yuzhno-Sakhalinsk,
[3, 4]Belarusian National Technical University, Minsk,
[3]Qingdao University of Technology, China)

Currently, the design of structures with a service life of 50 years in conditions of frost exposure is carried out on the basis of regulatory documents that recommend requirements for concrete quality indicators, its composition and materials for its manufacture. To a certain extent, this is a prescriptive principle, since the recommended requirements adopted during the design process are mandatory at the construction stage. The level of requirements depends on the aggressiveness of the environment and the parameters of temperature influences. As a result of laboratory selection, the working composition of concrete is determined, on the basis of which the technology of concrete works is being worked out. To ensure the service life of concrete for 50 years in an aggressive environment of class XF 4 with frost exposure, it is recommended to apply the following restrictions to the composition and quality indicators of concrete: water-

cement ratio (V/C) – not higher than 0.45; cement consumption – not less than 340 kg/m3; air intake – at least 4%; concrete strength class – at least B35; brand for frost resistance – depending on the air temperature in winter in the construction area. A number of restrictions are set to the quality of materials for concrete (cement, crushed stone, sand, water) and indicators of technological properties of the concrete mixture.

It should be noted that calculation methods for selecting the composition of the required frost resistance have not been developed. Therefore, the composition of concrete for the required grade of frost resistance is determined by the selection method. In this regard, the selection of the composition of concrete for frost resistance is a long, complex and time-consuming process performed by high-level technologists. Computational methods of durability prediction are developed to optimize design solutions by taking into account the actual operating conditions of structures and the use of materials with quality indicators sufficient to ensure the required service life of structures in specific operating conditions. The development of methods for calculating the durability of concrete determines the need to investigate the effectiveness of technological techniques used in the manufacture of structures and the boundary limits of the requirements for concrete technology to ensure the durability of structures in conditions of frost exposure.

Keywords: *concrete, durability, sea port facilities, transport facilities, design, technology, frost impact.*

УДК 691.328.43:691.544 **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-27-31**

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

К.Ю. БЕЛОМЕСОВА, канд. техн. наук, доц. И.П. ПАВЛОВА
(Брестский государственный технический университет)

В материале статьи рассмотрены основные положения предлагаемой расчетной модели, позволяющей определить количество базальтовой фибры, необходимое для получения дисперсно-армированных цементных композитов на основе расширяющихся вяжущих с требуемыми жесткостными характеристиками. В основе предлагаемой модели лежит рассмотрение цементного композита как четырехкомпонентного материала, состоящего из заполнителя, цементной матрицы с условно выделенной из нее транзитной зоной и фибры. В модели применены основные положения теории эффективной среды с учетом влияния свойств транзитной зоны.

Предложенная модель позволяет учитывать влияние состава напрягающего бетона, а также свойства его компонентов на требуемое для оптимизации структуры количество базальтовой фибры.

Ключевые слова: *напрягающий бетон, транзитная зона, дисперсное армирование, базальтовая фибра, модуль упругости, Теория Эффективной Среды.*

Введение. Совершенствование технологии цементных бетонов привело к получению композита, лишенного одного из основных недостатков, присущих традиционным бетонам, – усадочных деформаций. Так, в 1974 году группой исследователей во главе с профессором В.В. Михайловым [1, с. 26] было предложено использовать в качестве вяжущего вещества в цементных композитах специальные вяжущие – расширяющиеся цементы (*англ. expansive cement*). Помимо борьбы с усадочными деформациями, присущими цементным системам и обусловленными сложными физико-химическими процессами, применение расширяющихся композитов с высокой энергией расширения (напрягающих цементов) дает возможность получить регулируемое исходное напряженно-деформированное состояние элементов конструкции. Также, благодаря изменению кинетики гидратационных процессов, наблюдается благоприятное влияние на такие характеристики, как водонепроницаемость, стойкость к агрессивным воздействиям, морозостойкость, износоустойчивость и другие важные эксплуатационные характеристики конструкций и изделий на основе такого рода бетонов. Изначально расширяющиеся и напрягающие цементы получали полупромышленным способом на основе цементного клинкера и сульфоалюминатной композиции путем совместного помола компонентов, отдозированных в определенной пропорции. Сейчас наиболее распространённым является использование смеси готовых продуктов: портландцемента и расширяющейся добавки, что упрощает технологию получения напрягающего бетона и вместе с этим позволяет гибко реагировать путем изменения пропорции между портландцементом и расширяющейся добавкой на необходимость варьирования энергии расширения применительно к каждому конкретному случаю.

Вместе с тем установлено, что применение в качестве вяжущего напрягающих цементов с маркой по самонапряжению НЦ-2 и выше в силу специфики механизма расширения такого рода систем может привести к частичному разуплотнению структуры, сопровождающемуся спадами прочности бетона[1] [2, с. 16].

Помимо возможных спадов прочности в высокоактивных расширяющихся цементах и бетонах на их основе, в процессе эксплуатации в воздушных условиях данным системам характерно некоторое снижение свободных и связанных деформаций расширения, что связано со сложными физико-химическими процессами, происходящими в такого рода системах, а именно: продолжающейся усадкой, частичной перекристаллизацией эттрингита (переход высокосульфатной формы в моносульфатную).

С учетом вышесказанного, для модификации расширяющихся систем (нивелирование эффекта разуплотнения, предотвращения снижения расширения в процессе эксплуатации) предложено применять дисперсное армирование данных систем базальтовой фиброй. Благодаря своим размерам (диаметр d_f = 10 ÷ 30 мкм соизмерим с размером цементного зерна) базальтовую фибру предлагается рассматривать как компонент, модифицирующий цементный композит на уровне цементного микробетона – микроуровне[2]. А благодаря использованию расширяющихся вяжущих, механизм расширения которых основан на образовании повышенного количества игольчато-волокнистых кристаллов эттрингита, решается вопрос реализации модифицирования очередного уровня цементного композита – уровня цементирующего вещества (иначе – субмикроуровень).

[1] Paulava I., Belamesava K. Dependence of concrete strength on different methods of basalt fiber addicting // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О.Н. Лешкевич и др. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 63–75. URL: https://belniis.by/collected-research-papers/archives/2019-1/2019-11-05.pdf (см. с. 74).

[2] Коротких Д.Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры мелкозернистого цементного бетона и повышение его трещиностойкости: дис. … канд. техн. наук: 05.23.05. – Воронеж, 2001. – 188 л. (см. с. 49).

В результате совместного использования расширяющихся вяжущих и базальтовой фибры реализуется многоуровневое дисперсное армирование цементных композитов, рассматриваемое с точки зрения решения проблем трещиностойкости и в целом повышения основных характеристик цементных композитов (прочности на растяжение при изгибе, водонепроницаемости, коррозионной стойкости и др.).

Но если в случае получения расширяющихся композитов (с компенсированной усадкой и напрягающих) благодаря многолетним исследованиям разработаны базовые вариации используемых компонентов[3,4] [1; 3], предложены методики расчета соотношения расширяющейся добавки к портландцементу, действует нормативная база по определению основных физико-механических характеристик расширяющихся композитов и т.д., то с дисперсно-армированными базальтовой фиброй расширяющимися композитами (ровно как и дисперсно-армированными базальтовой фиброй традиционными композитами) все обстоит гораздо сложнее. Нормативные документы, регламентирующие количество применяемого дисперсно-армирующего волокна (фибры), правила (способы) введения такого рода волокон в цементные системы, способы перемешивания таких систем, методы испытания – разрозненны и практически отсутствуют. Все имеющиеся результаты зачастую носят рекомендательный характер и базируются на результатах исследований, полученных эмпирическим путем.

Применение аналитических моделей, позволяющих прогнозировать свойства цементных композитов, выработать базовые подходы к оптимизации структуры – это новый виток эволюции в современном бетоноведении. В ряде случаев применение обоснованных моделей позволит сократить обширные эксперименты, снизить сроки их проведения и материалоемкость, а также позволит получить более универсальные результаты, не привязанные к определенной сырьевой базе и т.п.

В настоящей работе представлена расчетная аналитическая модель, позволяющая определить количество базальтовой фибры, необходимое для получения дисперсно-армированных цементных композитов на основе расширяющихся вяжущих. В качестве базовой принята модель композитной системы, жесткостные параметры которой рассчитываются с учетом положений Дифференциальной Теории Эффективной Среды[5].

Расчетная модель. Основные параметры. Основные положения базовой модели базируются на положениях, опубликованных в работе[6]. Далее модель предлагается модифицировать с учетом появления в рассматриваемой композитной системе базальтовой фибры.

В основе базовой модели лежит рассмотрение цементного композита как трехкомпонентного материала, состоящего из заполнителя, цементной матрицы и расположенной между ними транзитной зоны. Ввод в систему третьего компонента – транзитной зоны – обусловлен необходимостью учета специфики структурообразования расширяющейся композитной системы. При этом транзитная зона, являясь частью цементного камня, формирует совместно с зерном заполнителя т.н. «эффективный» заполнитель[7].

Предложенная в данной работе модифицированная модель позволяет оценить введение еще одного компонента, а именно – базальтовой фибры.

В представленной работе использована рабочая гипотеза, согласно которой количество базальтовой фибры должно назначаться исходя из условия достижения дисперсно-армированной базальтовой фиброй цементной матрицей жесткостных характеристик, тождественных жесткостным характеристикам «эффективного» заполнителя при реальной концентрации последнего в бетоне, что позволит реализовать принцип макроскопической однородности системы.

При построении структурной модели расширяющегося дисперсно-армированного базальтовой фиброй цементного композита приняты следующие предпосылки (П):

П1 – при прогнозировании количества базальтовой фибры, вводимой в цементную систему, необходимо оценить влияние основных структурных факторов в неразрывной связи между собой: соотношения жесткостных характеристик компонентов композита (заполнитель, фибра, цементная матрица, транзитная зона) и геометрии структуры (объемная концентрация и удельная поверхность применяемого заполнителя, фибры);

П2 – цементный композит представлен в виде непрерывной матрицы (цементный камень), в теле которой дискретно расположены «эффективный заполнитель», представляющий собой зерна заполнителя с оболочкой транзитной зоны вокруг, и армирующие волокна базальтовой фибры;

П3 – частица заполнителя с оболочкой транзитной зоны вокруг заменяются эффективной частицей с радиусом $a = \overline{r}_{agg} + \delta_{itz}$.

---

[3] Титов М.Ю. Бетоны с компенсированной усадкой на расширяющих добавках: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.05 / НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. – М., 2012. – 22 с.

[4] Потапова Ю.И. Структура и свойства бетонов с двухстадийным расширением: дис. … канд. техн. наук: 05.23.05. – Ростов-на-Дону, 2015. – 254 л.

[5] Основной идеей Теории Эффективной Среды (англ. Differential Effective Medium Theory, в дальнейшем D–EMT) является возможность замены согласно определенным правилам неупорядоченной композитной структуры, состоящей из элементов с различными характеристиками, гомогенной однородной средой с некоторыми усредненными, т.н. эффективными характеристиками.

[6] Павлова И.П. Прогнозирование собственных деформаций и напряжений напрягающего бетона на основе структурно-механической модели расширяющегося композита: дис. … канд. техн. наук: 05.23.05. – Брест, 2005. – 159 л. (см. с. 82).

[7] См. сноску 6, с. 86.

Для упрощения расчетов основных параметров структурной модели расширяющегося дисперсно-армированного базальтовой фиброй цементного композита был использован ряд допущений, не искажающих физического смысла рассматриваемого явления:

– моделируемая система содержит равномерно распределенные по объему матрицы равновеликие шарообразные зерна заполнителя приведенного радиуса;

– в принятой структурной модели толщина транзитной зоны вокруг каждого зерна заполнителя имеет постоянное значение $\delta_{itz} = const$;

– армирующие волокна представляют собой цилиндры с диаметром d_f и длиной l_f.

Геометрические параметры структурной модели. На первом этапе, основываясь на принятых допущениях, рассчитываются следующие параметры: характеристический радиус зерна заполнителя $\overline{r}_{agg}$ и фактическая удельная поверхность заполнителя $S_{уд}$. На этом же этапе согласно[8] [4, с. 5538] определяется объемное содержание транзитной зоны в бетоне V_{itz} с учетом перколированных участков:

$$V_{itz} = 1 - e_v(\delta_{itz}) - c_{agg}. \quad (1)$$

Объем цементной матрицы V_m за вычетом объема, занимаемого транзитной зоной, может быть рассчитан по формуле:

$$V_m = 1 - c_{agg} - V_{itz}. \quad (2)$$

Жесткостные характеристики элементов структурной модели композита. На следующем этапе расчета предлагается в качестве заполнителя рассматривать некоторый «идеализированный заполнитель» сферической формы с размером зерна, равным размеру зерна заполнителя с транзитной зоной вокруг него (рисунок 1), и с усредненными, так называемыми, эффективными, упругими характеристиками.

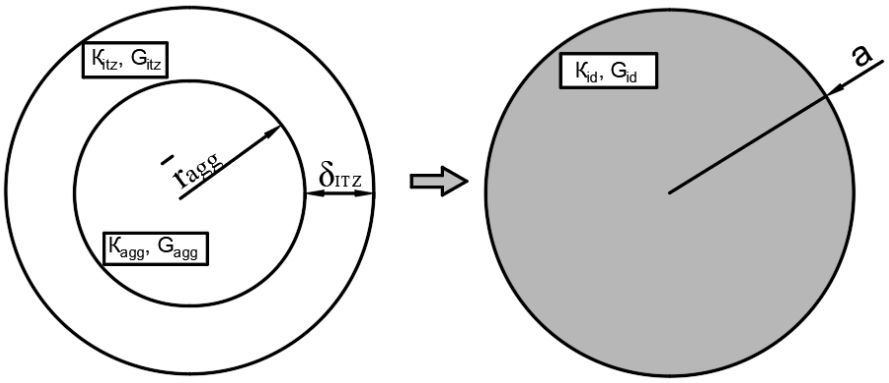


Рисунок 1. – Трансформация композитного включения в эффективную частицу с размером a в соответствии с правилами D–EMT[9]

Для определения эффективных деформативных характеристик: объемный модуль упругости K_{id} и модуль сдвига G_{id} «идеализированного заполнителя» использованы положения Дифференциальной Теории Эффективной Среды[10].

В соответствии с правилами, сформулированными в D–EMT, частица заполнителя с размером $\overline{r}_{agg}$ и деформативными характеристиками K_{agg}, G_{agg}, помещенная в транзитную зону размером $\overline{r}_{agg} + \delta_{itz}$, с деформативными характеристиками K_{itz}, G_{itz}, заменяется новой эффективной частицей с размером $a = \overline{r}_{agg} + \delta_{itz}$ и соответствующими деформативными характеристиками K_{id}, G_{id}.

Для пространственной модели эффективный модуль сдвига G_{id} композитного включения с учетом транзитной зоны (эффективной частицы) находят из решения соответствующего квадратного уравнения [5, с. 459]:

$$A\left(\frac{G_{id}}{G_{itz}}\right)^2 + 2B\left(\frac{G_{id}}{G_{itz}}\right) + C = 0, \quad (3)$$

коэффициенты которого рассчитывают по формулам, приведенным в работе [5, с. 459].

[8] Bentz D.P., Garboczi E.J. Computer Modeling of Interfacial Transition Zone: Microstructure and Properties. In book: Engineering and Transport Properties of the Interfacial Transition Zone in Cementitous Composites (P. 349–385). URL: https://www.researchgate.net/publication/239823312_Computer_Modelling_of_Interfacial_Transition_Zone_Microstructure_and_Properties (см. с. 371).

[9] См. сноску 8, с. 373.

[10] См. сноску 8, с. 373.

Эффективный объемный модуль упругости K_{id} «идеализированного заполнителя» с учетом свойств транзитной зоны может быть рассчитан по зависимости, предложенной в работе [5, с. 460]:

$$K_{id} = K_{itz} + \frac{p(K_{agg} - K_{itz})}{1 + (1-p)\left[\dfrac{K_{agg} - K_{itz}}{K_{itz} + 4/3G_{itz}}\right]}. \quad (4)$$

Приведенные решения справедливы для случая одиночного включения в бесконечной матрице (объемная концентрация заполнителя не превышает 0,05). Реальный же бетон содержит в своей структуре изначально большее количество заполнителя ($c_{agg} \geq 0{,}6\ldots0{,}7$), поэтому следующим шагом будет поэтапное введение «идеализированного заполнителя» в цементную матрицу (K_m, G_m) до достижения концентрации заполнителя, равной реальной объемной концентрации заполнителя в цементном бетоне.

Расчет жесткостных характеристик цементной матрицы, содержащей реальное количество «идеализированного заполнителя», производится, используя следующие формулы согласно [5, с. 458]:

$$K_o = K_m + k \cdot K_m \cdot c; \quad (5)$$

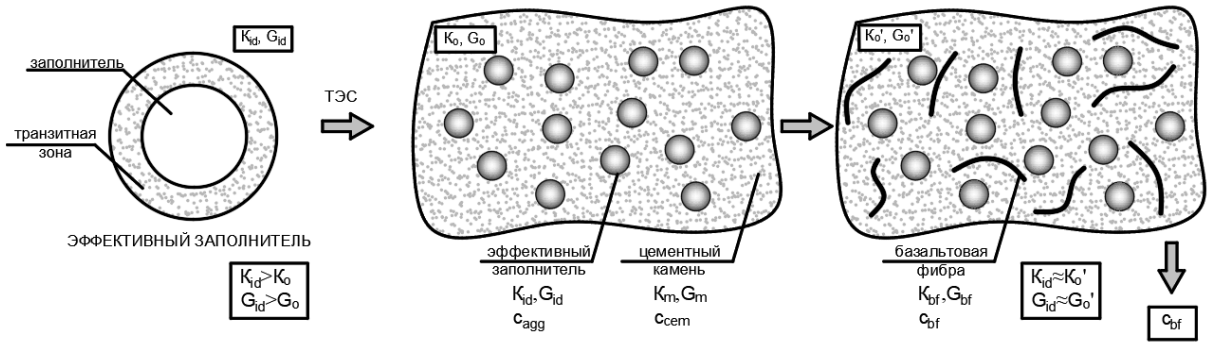
$$G_o = G_m + g \cdot G_m \cdot c, \quad (6)$$

где k и g – безразмерные коэффициенты, обычно определяемые как характеристические модули и зависящие от формы моделируемых частиц и соотношения K_m/K_{id} и G_m/G_{id}.

Путем поэтапной квазигомогенизации для реальных значений концентрации заполнителя рассчитывается жесткость композитной системы K_o, G_o без учета введения фибры.

Для выполнения главного условия рабочей гипотезы должны выполняться следующие равенства: $K_o = K_{id}$ и $G_o = G_{id}$ соответственно. На данном этапе $K_o < K_{id}$ и $G_o < G_{id}$.

Поэтому на следующем этапе расчета в композитную систему, состоящую из «эффективного» заполнителя и цементного камня в реальных концентрациях, поэтапно, в соответствии с постулатами D–EMT, вводится базальтовая фибра, имеющая жесткостные характеристики K_{bf} и G_{bf}, до момента выполнения следующих равенств: объемный модуль и модуль сдвига композита станут равными аналогичным идеализированного «эффективного» заполнителя $K_0' = K_{id}$ и $G_0' = G_{id}$ соответственно. На рисунке 2 схематически представлена трансформация композитной системы в соответствии с положениями ТЭС.



K, G, c – соответственно объемный модуль, модуль сдвига и концентрация;
id – эффективный заполнитель; m – цементная матрица; o – бетон без базальтовой фибры;
o' – бетон с дисперсным армированием базальтовой фиброй

Рисунок 2. – Трансформация композитной системы для определения концентрации вводимой фибры

Модуль сдвига (G_{itz}, G_f, G_m, G_{agg}) и модуль объемных деформаций (K_{itz}, K_f, K_m, K_{agg}) каждого из компонентов композита определяют по следующим зависимостям согласно [6, с. 892]:

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}; G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (7)$$

где K – модуль объемных деформаций;
G –модуль сдвига;
E – модуль упругости;
ν – коэффициент Пуассона.

Расчет жесткостных характеристик дисперсно-армированной базальтовой фиброй цементной матрицы, содержащей реальное количество «идеализированного заполнителя», производится, используя формулы 5, 6 с вводом дополнительного коэффициента формы k_{shape}, позволяющего учесть ввод в систему цилиндрического включения.

Заключение. Разработана аналитическая модель для определения концентрации фибры, вводимой в расширяющуюся цементную систему, представляющая собой четырехкомпонентную систему, состоящую из заполнителя, цементной матрицы, расположенной между ними транзитной зоны и фибры.

Количество базальтовой фибры назначается исходя из условия достижения дисперсно-армированной базальтовой фиброй цементной матрицей жесткостных характеристик, тождественных жесткостным характеристикам «эффективного» заполнителя (заполнитель с транзитной зоной вокруг него) при реальной концентрации последнего в бетоне, что позволит реализовать принцип макроскопической однородности системы.

Разработанная аналитическая модель применима для любых составов напрягающего бетона. Верификация модели и параметрические исследования будут опубликованы в следующей статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции. – М.: Стройиздат, 1974. – 312 с.
2. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона. – Брест: БПИ, 1998. – 244 с.
3. Михайлов В.В. Напрягающий цемент. В кн.: Труды совещания по химии цемента. – М.: Промстройиздат, 1956. – 120 с.
4. Lu B., Torquato S. Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle system // Physical Review A. – 1992. – Vol. 45, iss. 8. – P. 5530–5544.
5. Garboczi E.J., Berryman J.G. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations // Mechanics of Materials. – 2001. – Vol. 33, № 8 – P. 455–470.
6. Giordano S. Differential schemes for the elastic characterization of dispersions of randomly oriented ellipsoids // European Journal of Mechanics. – 2003. – Vol. 22, iss. 6. – P. 885–902.

REFERENCES

1. Mikhailov, V.V. & Litver, S.L. (1974). *Rasshiryayushchiisya i napryagayushchii tsementy i samonapryazhennye zhelezobetonnye konstruktsii*. Moscow: Stroiizdat. (in Russ.).
2. Tur, V.V. (1998). *Eksperimental'no-teoreticheskie osnovy predvaritel'nogo napryazheniya konstruktsii pri primenenii napryagayushchego betona.* Brest: BPI. (in Russ.).
3. Mikhailov, V.V. (1956). Napryagayushchii tsement. In *Trudy soveshchaniya po khimii tsementa*. Moscow: Promstroiizdat. (in Russ.).
4. Lu, B. & Torquato, S. (1992). Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle system. *Physical Review A, 45(8),* 5530–5544. DOI: 10.1103/PhysRevA.45.5530.
5. Garboczi, E.J. & Berryman, J.G. (2001). Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations. *Mechanics of Materials, 33(8),* 455–470. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860258.
6. Giordano, S. (2003). Differential schemes for the elastic characterization of dispersions of randomly oriented ellipsoids. *European Journal of Mechanics, 22(6),* 885–902. DOI: 10.1016/S0997-7538(03)00091-3.

Поступила 12.05.2023

ANALYTICAL MODEL FOR CALCULATING THE AMOUNT OF BASALT FIBER TO PRODUCE DISPER-SION-REINFORCED CONCRETE WITH AN OPTIMAL STRUCTURE

K. BELAMESAVA, I. PAULAVA
(Brest State Technical University)

The article deals with the main provisions of the proposed calculation model allowing to determine the amount of basalt fiber required to obtain dispersion-reinforced cement composites based on expansive binders with required stiffness characteristics. The proposed model is based on consideration of cement composite as a three-component material consisting of aggregate, cement matrix with conditionally separated from it transition zone, and fiber. The model applies the main provisions of the Effective Medium Theory taking into account the influence of the properties of the transition zone.

The proposed model allows taking into account the influence of the mix of the self-stressing concrete, as well as the properties of its components on the amount of basalt fiber required to optimize the structure.

Keywords: *stressed concrete, transit zone, dispersed reinforcement, basalt fiber, elastic modulus, Theory of Effective Medium.*

УДК 721/728.004.62/.63 **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-32-38**

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПО ЗАВИСИМОСТИ ФИЗИЧЕСКОГО ИЗНОСА

канд. техн. наук, доц. А.А. ВАСИЛЬЕВ
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

В статье показана актуальность оценки физического износа (ФИ) элементов и конструкций зданий и сооружений. Отображены недостатки существующих временных методик прогнозирования ФИ. Обоснована необходимость разработки моделей ФИ для различных типов конструкций и эксплуатационных условий. Рассмотрена логистическая зависимость предельного срока эксплуатации строительных конструкций от показателей ФИ. Выполнено исследование прогнозной зависимости ФИ для бетонных и железобетонных конструкций на основе логистического тренда. Предложены коэффициенты, повышающие объективность использования логистической зависимости прогнозирования ФИ бетонных элементов, железобетонных элементов и конструкций. Получены значения постоянной износа (λ) для разных временных интервалов, а также средневзвешенные значения ($\lambda_{ср}$) для различных типов железобетонных элементов и эксплуатационных условий. Выполнен анализ полученных значений постоянной износа с существующими.

Ключевые слова: *физический износ, бетонные элементы, железобетонные элементы и конструкции, логистическая зависимость, постоянная износа.*

Введение. В процессе эксплуатации здания и сооружения, независимо от их капитальности, подвергаются материальному (физическому) износу (ФИ). Под ФИ конструкции, элемента, системы инженерного оборудования и здания в целом понимается утрата ими первоначальных технико-эксплуатационных качеств в результате воздействия природно-климатических факторов и жизнедеятельности человека. Величина ФИ дает представление о техническом состоянии конструктивных элементов и всего здания (сооружения) в целом и определяется дефектами и повреждениями конструкций (элементов) зданий (сооружений). Этот показатель является количественным, выраженным в относительной величине (процентах) или в абсолютном (стоимостном), определяющим потерю стоимости от первоначальной величины. Таким образом, в системе ЖКХ ФИ зданий и сооружений является важнейшим показателем, характеризующим их состояние в количественном выражении, а следовательно, отражает необходимость выполнения различных видов ремонта. При его применении эффективность выполнения ремонтных работ в системе эксплуатации можно оценивать через количественный показатель, т.е. через его износ, а не только качественный, констатирующий состояние здания с точки зрения его исправности и безаварийности [1].

Основная часть. При массовой оценке технического состояния зданий и сооружений или отсутствии возможности их визуального осмотра применяют расчетные методики определения физического износа, основанные на временном методе определения физического износа. Первую такую методику еще в XIX веке разработал архитектор Росс. Далее это направление активно развивалось российскими учеными: В.С. Сроковским, С.К. Балашовым, В.В. Анисимовым и В.Е. Николайцевым, В.И. Бабакиным, Д.Л. Бронером, Б.М. Колотилкиным, В.К. Соколовым и др.

Большинство исследований по разработке расчетных методик определения ФИ были проведены учеными СССР (одно из последних исследований проведено в 1970 г. В.И. Бабакиным). Все временные методики данного периода базируются на группах капитальности зданий и сроке их эксплуатации. Необходимо отметить, что у всех них присутствуют различные недостатки, однако основным и общим для них является очень низкое качество конечного результата.

Многочисленными исследователями, такими как С.В Аридова, Т.В. Белых, Е.В. Кобзев, А.Х. Байбурин, В.С. Башкатов, А.В. Белых, А.А. Васильев, И.Б. Жижко, К.В. Демьянов, Н.П. Запащикова, Р.О. Корсаков, В.Я. Мищенко, К.М. Плотников, О.Н. Попова, Т.Л. Симанкина, Н.В. Ширко, В.А. Соколов, А.И. Субботин, М.Н. Шутова, Е.В. Тарарушкин, Н.В. Головина, Г.Д. Шмелев и др., ведется работа по усовершенствованию существующих методик оценки ФИ, созданию новых[1,2,3] [1–12].

Качественное и объективное прогнозирование физического износа бетонных элементов, железобетонных элементов и конструкций сегодня, с учетом огромного количества находящихся в эксплуатации зданий и сооружений (причем, длительные сроки), особенно актуально, поэтому математическое моделирование ФИ является одной из самых востребованных современных задач.

---

[1] Шмелев Г.Д., Головина Н.В. Прогнозирование остаточного ресурса и надежности строительных конструкций с использованием нелинейной модели развития физического износа // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сб. тез. Шестнадцатой междунар. межвуз. науч.-практ. конф. студ., магистр., асп. и мол. уч. – М.: МГСУ, 2013. – С. 163–165.

[2] Булавко А.Н., Васильев А.А. Анализ существующих методов оценки физического износа зданий и сооружений // Проблемы безопасности на транспорте: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В. И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2015. – С. 280–281.

[3] Васильев А. А. Анализ существующей оценки физического износа конструкций зданий и сооружений // «OPEN INNOVATION»: сб. статей VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: Наука и Просвещение, 2019. – С. 36–38.

По мнению автора [2], для математического моделирования сроков службы несущих элементов и конструкций зданий и сооружений применим закон нормального распределения, а для некоторых ограждающих и защитных конструкций – экспоненциальный закон. Тем не менее наиболее приближенным к реальным конструкциям является полный цикл развития. Таким образом, поскольку логистическая зависимость наиболее точно описывает полный цикл развития ФИ, именно ее необходимо использовать для моделирования физического износа.

На основании того, что при прогнозировании работоспособности строительных конструкций зданий и сооружений на базе ретроспективных данных физического износа на первом этапе необходимо прогнозировать предельный срок эксплуатации строительной конструкции до достижения ею максимально возможной степени физического износа, авторами [4], с учетом исследований[4] и [3], была предложена функция зависимости срока службы от величины физического износа конструкций *T(k)*:

$$T(k) = \frac{T_{\text{сл.max}}}{e^{b+ak}+1}, \tag{1}$$

где $T_{\text{сл.max}}$ – нормативный (максимальный) срок службы, годы;

e – основание натуральных логарифмов;

b – параметр, определяющий положение точки перегиба;

a – параметр, определяющий наклон кривой в точке перегиба (для функции износа $a < 0$);

k – физический износ, %.

После математических преобразований ими получены выражения для различных конструктивных элементов. Так, для различных типов бетонных и железобетонных элементов:

$$T(k) = \frac{125}{e^{4,3-0,11k}+1}. \tag{2}$$

Задавая параметр $T_{\text{сл.max}}$, оказывается влияние на установление коэффициентов a и b, соответственно, на форму логистической кривой, и, как следствие, на точность прогнозирования. При этом для каждого типа конструкций с различными нормативными сроками эксплуатации коэффициенты будут разными, что значительно усложняет задачу прогнозирования. При использовании такой методики наблюдается процесс усреднения показателей ФИ, что неверно, поскольку в реальной эксплуатации нередко наличие элемента, имеющего максимальный ФИ по сравнению с остальными, приводит к необходимости выполнения капитального ремонта с его усилением (заменой).

Поскольку несущие конструкции относятся к сложным многопараметрическим системам и в процессе длительной эксплуатации подвергаются воздействию многочисленных факторов, для сбора статистических данных необходимо обеспечить продолжительные сроки наблюдения, так как собрать и объективно систематизировать данные по ФИ для различных групп конструкций, даже эксплуатирующихся приблизительно в одних условиях, очень сложно, а для различных эксплуатационных условий – практически невозможно. Следовательно, авторы [3] полагают, что в условиях повышенной статистической неопределенности применение данной модели невозможно. Тем не менее, по мнению автора, данная модель в значительной степени отражает сущность процесса ФИ несущих конструкций различных типов и ее возможно использовать как «идеалистическую», т.е. модель, к соответствию которой необходимо стремиться в процессе жизненного цикла конструкций.

С учетом общепринятого срока эксплуатации железобетона, равного 100 лет, в общем виде выражение для прогнозирования ФИ несущих бетонных и железобетонных конструкций примет вид

$$T(k) = \frac{100}{e^{4,3-0,11k}+1}. \tag{3}$$

Преобразуем функцию $T(k)$ в обратную ей функцию $K(t)$ с учетом общепринятых: граничного значения ФИ = 80% и нормативного срока эксплуатации железобетона t = 100 лет:

$$K(t) = 39,09 - \frac{\ln\left(\frac{100}{t}-1\right)}{0,11}. \tag{4}$$

Здания и сооружения классифицируются по классам ответственности, железобетонные элементы (ЖБЭ) и конструкции (ЖБК) в них значительно отличаются технологией изготовления, условиями эксплуатации, нагрузками, воздействиями, применением бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов), армированием и т.д. Поэтому полученную зависимость (4) невозможно использовать напрямую для прогнозирования ФИ всех типов бетонных и железобетонных элементов, эксплуатирующихся различные сроки в разных воздушных средах.

[4] См. сноску 1.

Вышеприведенное необходимо учитывать в прогнозировании ФИ бетона и железобетона. Поэтому в полученную зависимость (4) предлагается ввести коэффициенты: *c* – определяющий граничное значение срока наступления граничного значения ФИ элемента (конструкции); *d* – граничное значение ФИ с учетом степени ответственности конструкции (здания, сооружения), условий эксплуатации, нагрузок и воздействий, реальной частоты наблюдений, степени реагирования и т.д.

$$K(t) = \left(39,09 - \frac{\ln\left(\frac{100c}{t} - 1\right)}{0,11} \right) d. \tag{5}$$

С учетом условий и качества эксплуатации, степени ответственности конструкции, воздействий и нагрузок на здания и сооружения определены основные группы строительных объектов и для каждой из них получены зависимости для прогнозирования ФИ ЖБЭ и ЖБК [1].

Коэффициенты *c* и *d* для различных конструктивных элементов зданий и сооружений и эксплуатационных условий приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Значения коэффициентов *c* и *d* для различных типов железобетонных элементов

Элемент (конструкция)	Граничное значение ФИ, %	Нормативное значение срока службы здания, лет	Граничное значение срока службы элемента, лет	Коэффициент	
				c	*d*
Жилые здания					
Колонны	80	150	100	1,00	1,00
Плиты перекрытия (перекрытие)	80		100	1,00	1,00
Плиты покрытия (покрытие)	70		75	0,75	0,88
Стеновые панели	70		100	1,00	0,88
Панели ограждения	70		75	0,75	0,88
Общественные здания					
Колонны	75	150	100	1,00	0,94
Плиты перекрытия (перекрытие)	75		100	1,00	0,94
Плиты покрытия (покрытие)	70		75	0,75	0,88
Стеновые панели	65		100	1,00	0,81
Панели ограждения	65		75	0,75	0,81
Цеха с малоагрессивной средой					
Колонны	75	80	80	0,80	0,94
Ригели	75		80	0,80	0,94
Плиты перекрытия	70		80	0,80	0,88
Фермы (балки покрытия)	70		70	0,70	0,88
Плиты покрытия	60		50	0,50	0,75
Панели ограждения	60		50	0,50	0,75
Цеха со среднеагрессивной средой					
Колонны	70	60	60	0,60	0,88
Ригели	70		60	0,60	0,88
Плиты перекрытия	65		60	0,60	0,81
Фермы (балки покрытия)	60		45	0,45	0,75
Плиты покрытия	55		40	0,40	0,69
Панели ограждения	55		40	0,40	0,69
Цеха с сильноагрессивной средой					
Колонны	60	50	50	0,50	0,75
Ригели	60		50	0,50	0,75
Плиты перекрытия	55		50	0,50	0,69
Фермы (балки покрытия)	55		30	0,30	0,69
Плиты покрытия	50		25	0,25	0,63
Панели ограждения	50		25	0,25	0,63
Коровники					
Колонны (стоечная часть полурам)	70	50	50	0,50	0,88
Балки (балочная часть полурам)	65		40	0,40	0,81
Плиты покрытия	60		25	0,25	0,75
Панели ограждения	70		25	0,25	0,88
Свинарники					
Колонны (стоечная часть полурам)	70	40	25	0,25	0,88
Балки (балочная часть полурам)	65		20	0,20	0,81
Плиты покрытия	60		15	0,15	0,75
Панели ограждения	70		25	0,25	0,88

Полученная зависимость (с учетом предлагаемых коэффициентов) является «идеалистической», т.е. зависимостью, которую можно использовать при проектировании и строительстве зданий и сооружений для планирования: времени безопасной эксплуатации; мероприятий по поддержанию безопасной эксплуатации в период эксплуатационного срока. К такому изменению ФИ необходимо стремиться при эксплуатации объектов строительства.

В реальных условиях эксплуатации определенный по результатам оценки ФИ элемента (конструкции) фактический срок эксплуатации может отличаться (даже значительно) от прогнозируемого. Предлагаемая зависимость позволяет, сравнивая значения фактического ФИ с прогнозируемым, регулировать сроки капитальных ремонтов, восстановления и замены ЖБЭ и ЖБК. Также она дает возможность регулировать периодичность проведения осмотров, обследований, капитальных ремонтов. Однако необходимо отметить, что для корректного использования предлагаемой прогнозной методики необходимо повышать точность применяемых методов оценки ФИ. Кроме того, необходимо отметить, что в настоящее время наибольшее распространение при оценке остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений имеет детерминированный подход. Он позволяет рассчитывать остаточный ресурс по различным признакам, одним из которых является изменение степени физического износа.

Остаточный ресурс несущей конструкции (годы) определяется по формуле:

$$T_р = \frac{k}{\lambda}, \tag{6}$$

где $T_р$ – остаточный ресурс, годы;

k – коэффициент, принимаемый: 0,16 – при определении остаточного ресурса до капитального ремонта, 0,22 – при определении остаточного ресурса до аварийного состояния;

λ – постоянная износа, определяемая по данным обследования на основании изменения физического износа на момент обследования.

Таким образом, объективное определение значений постоянной износа является очень важным. В [13] приведено, что для железобетона в период нормальной эксплуатации λ = 0,003–0,005. С течением времени, по данным [14], она увеличивается в конце срока эксплуатации примерно в три раза и возрастает с λ = 0,003 до 0,01.

Для оценки постоянной износа использовали зависимость (6) с учетом предложенных коэффициентов. Были получены значения постоянной износа (λ) для разных временных интервалов, средневзвешенные значения ($\lambda_{ср}$) для различных железобетонных элементов при эксплуатации в разных условиях, остаточный ресурс до капитального ремонта ($t_к$), лет, и наступления аварийного состояния ($t_а$), лет, на основании рассчитанных значений $\lambda_{ср}$ (таблица 2).

Таблица 2. – Значения постоянных износа и остаточного ресурса для различных типов железобетонных элементов

Элемент	Временной интервал, лет	Интервал ФИ, %	Постоянная износа, λ	Средневзвешенное значение, $\lambda_{ср}$	Остаточный ресурс, лет	
					$t_к$	$t_а$
1	2	3	4	5	6	7
Условия открытой атмосферы						
Мосты						
Опоры	0,00–10,0	0,00–17,0	0,0170	0,0070	22,9	31,4
	10,0–20,0	17,0–23,5	0,0065			
	20,0–80,0	23,5–45,5	0,0037			
	80,0–90,0	45,5–52,0	0,0065			
	90,0–100	52,0–70,0	0,0180			
Пролетные конструкции	0,00–5,0	0,00–12,0	0,0240	0,0084	19,1	26,2
	5,00–10,0	12,0–16,5	0,0090			
	10,0–40,0	16,5–32,5	0,0053			
	40,0–45,0	32,5–37,0	0,0090			
	45,0–50,0	37,0–40,0	0,0100			
Путепроводы						
Опоры	0,00–10,0	0,00–18,0	0,0180	0,0070	22,9	31,4
	10,0–20,0	18,0–26,5	0,0085			
	20,0–80,0	26,5–48,5	0,0037			
	80,0–90,0	48,5–55,0	0,0070			
	90,0–100	55,0–70,0	0,0145			
Пролетные конструкции	0,00–5,0	0,00–13,0	0,0260	0,0183	8,74	12,0
	5,00–10,0	13,0–18,5	0,1100			
	10,0–45,0	18,5–37,0	0,0053			
	45,0–55,0	37,0–45,5	0,0085			
	55,0–60,0	45,5–60,0	0,0290			

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
Эстакады						
Опоры	0,00–10,0	0,00–19,0	0,0190	0,0080	20,0	27,5
	10,0–20,0	19,0–26,5	0,0075			
	20,0–80,0	26,5–51,5	0,0042			
	80,0–90,0	51,5–59,0	0,0075			
	90,0–100	59,0–80,0	0,0210			
Пролетные конструкции	0,00–10,0	0,00–19,5	0,0195	0,0084	19,1	26,2
	10,0–20,0	19,5–26,5	0,0070			
	20,0–60,0	26,5–45,5	0,0048			
	60,0–70,0	45,5–55,5	0,0100			
	70,0–75,0	55,5–70,0	0,0145			
Склады готовой продукции						
Колонны	0,00–10,0	0,00–20,0	0,0200	0,0085	18,8	25,9
	10,0–20,0	20,0–26,5	0,0165			
	20,0–80,0	26,5–48,5	0,0037			
	80,0–90,0	48,5–55,5	0,0070			
	90,0–100	55,5–75,0	0,0195			
Подкрановые балки	0,00–5,00	0,00–14,5	0,0290	0,0120	13,3	18,3
	5,00–10,0	14,5–20,0	0,0110			
	10,0–40,0	20,0–39,0	0,0063			
	40,0–45,0	39,0–44,5	0,0110			
	45,0–50,0	44,5–60,0	0,0310			
Условия зданий сельскохозяйственного назначения						
Коровники						
Колонны (стоечная часть полурам)	0,00–5,00	0,00–19,0	0,0380	0,0175	9,14	12,6
	5,00–10,0	19,0–25,5	0,0130			
	10,0–30,0	25,5–43,0	0,0088			
	30,0–35,0	43,0–50,0	0,0140			
	35,0–40,0	50,0–70,0	0,0400			
Балки (балочная часть полурам)	0,00–5,00	0,00–16,0	0,0320	0,0150	10,7	14,7
	5,00–10,0	16,0–22,0	0,0120			
	10,0–30,0	22,0–37,0	0,0075			
	30,0–35,0	37,0–42,5	0,0110			
	35,0–40,0	42,5–60,0	0,0350			
Плиты покрытия	0,00–5,00	0,00–13,5	0,0270	0,0125	12,8	17,6
	5,00–10,0	13,5–18,5	0,0100			
	10,0–30,0	18,5–31,0	0,0063			
	30,0–35,0	31,0–36,0	0,0100			
	35,0–40,0	36,0–50,0	0,0280			
Панели ограждения	0,00–5,00	0,00–21,5	0,0430	0,0200	8,00	11,0
	5,00–10,0	21,5–29,0	0,0150			
	10,0–30,0	29,0–49,0	0,0100			
	30,0–35,0	49,0–57,0	0,0160			
	35,0–40,0	57,0–80,0	0,0460			
Свинарники						
Колонны (стоечная часть полурам)	0,00–2,50	0,00–15,5	0,0620	0,0256	6,25	8,59
	2,50–5,00	15,5–21,5	0,0240			
	5,00–10,0	21,5–28,5	0,0140			
	10,0–20,0	28,5–42,0	0,0135			
	20,0–25,0	42,0–65,0	0,0440			
Балки (балочная часть полурам)	0,00–2,50	0,00–14,5	0,0580	0,0240	6,67	9,17
	2,50–5,00	14,5–20,0	0,0220			
	5,00–10,0	20,0–26,5	0,0130			
	10,0–20,0	26,5–39,0	0,0125			
	20,0–25,0	39,0–60,0	0,0420			
Плиты покрытия	0,00–2,50	0,00–12,0	0,0480	0,0200	8,00	11,0
	2,50–5,00	12,0–16,5	0,0180			
	5,00–10,0	16,5–22,5	0,0120			
	10,0–20,0	22,5–32,5	0,0100			
	20,0–25,0	32,5–50,0	0,0350			
Панели ограждения	0,00–2,50	0,00–17,0	0,0680	0,0280	5,71	7,86
	2,50–5,00	17,0–23,5	0,0260			
	5,00–10,0	23,5–31,0	0,0150			
	10.0–20,0	31,0–45,5	0,0145			
	20,0–25,0	45,5–70,0	0,0490			

Таким образом, авторские исследования изменения во времени ФИ железобетонных элементов, эксплуатирующихся в различных условиях, показывают, что в условиях открытой атмосферы значения постоянной износа близки к предлагаемым [13], значительно возрастая к концу расчетного срока эксплуатации (λ = 0,0145…0,0290); в условиях зданий сельскохозяйственного назначения – выше (коровники λ = 0,0063…0,0100; свинарники λ = 0,0125…0,0145) и тем более значительно выше в конце эксплуатационных сроков для неудовлетворительного и предаварийного технических состояний (λ до 0,0490).

Кроме того, значения остаточного ресурса, рассчитанные на основании применения средневзвешенных значений ФИ ($\lambda_{ср}$), показывают на недостаточную корректность их использования, что необходимо учитывать при расчете сроков наступления неудовлетворительного (предаварийного) технического состояния, выполнения капитальных ремонтов (усилений, замен) и т.д.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Прогнозирование ФИ бетонных и железобетонных элементов и конструкций с использованием нелинейного моделирования на базе логистического тренда позволяет получить «идеалистическую» модель ФИ, к которой необходимо стремиться весь «жизненный цикл» элементов и конструкций, от создания, до демонтажа.
2. Определение ФИ железобетонных элементов и конструкций на базе экспертных оценок с применением предлагаемого моделирования даст возможность в любой временной период оценивать фактическую скорость ФИ и, сравнив ее с модельной, уточнять сроки планируемых ремонтов и т.д.
3. Использование предложенной методики требует очень жесткого подхода к точности и объективности используемого метода оценки ФИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.А. Оценка и прогнозирование физического износа строительных конструкций, зданий и сооружений / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2021. – 189 с.
2. Ройтман А.Г. Надежность конструкций эксплуатируемых зданий. – М.: Стройиздат, 1985. – 175 с.
3. Головина Н.В., Шмелев Г.Д. Сравнительный анализ нелинейных моделей прогнозирования остаточного ресурса и работоспособности конструктивных элементов жилых зданий // Вестн. МГСУ. – 2016. – № 5. – С. 10–15.
4. Гаврильев И.М., Корольков Д.И., Гравит М.В. Модифицированная методика расчета остаточного ресурса с использованием экспоненциального распределения // Вестн. Евраз. науки. – 2019. – Т. 11, № 2. – С. 1–14.
5. Попова О.Н., Симанкина Т.Л. Методика оценки ресурса работоспособности конструктивных элементов жилых зданий // Инженер.-строит. журн. – 2013. – № 7. – С. 40–48.
6. Белых А.В. Методика определения величины физического износа нежилых зданий для целей массовой оценки // Журн. правовых и экон. исслед. – 2013. – № 2. – С. 78–86.
7. Васильев А.А. Роль физического износа и его оценки в системе технической эксплуатации зданий // Вестн. БелГУТа: Наука и транспорт. – 2009. – № 2(19). – С. 72–79.
8. Васильев А.А., Яньшина Д.А., Храмова А.А. Прогнозирование физического износа железобетонных элементов и конструкций для различных типов зданий и сооружений // Наука, инновации, образование: актуальные вопросы и современные аспекты / под общ ред. Г.Ю. Гуляева. – Пенза: Наука и Просвещение, 2021. – С. 149–160.
9. Симанкина Т.Л., Ширко Н.В. Оценка физического износа зданий с применением визуального моделирования дефектов // Изв. вузов. Стр-во. – 2011. – № 7(633). – С. 91–97.
10. Соколов В.А. Оценка технического состояния и физического износа строительных конструкций с использованием вероятностных методов технической диагностики // Изв. вузов. Стр-во. – 2014. – № 1(661). – С. 94–100.
11. Тарарушкин Е.В. Применение нечеткой логики для оценки физического износа несущих конструкций зданий // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 10. – С. 77–82.
12. Оценка постоянной физического износа железобетонных элементов и конструкций для различной агрессивности эксплуатационной среды / А.А. Васильев, Д.А. Яньшина, Ю.К. Кабышева и др. // Наука, общество, образование в эпоху цифровизации и глобальных изменений / под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. – Пенза: Наука и просвещение, 2022. – С. 94–108.
13. Пухонто Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен). – М.: АСВ, 2004. – 424 с.
14. Бойко, М.Д. Диагностика повреждений и методы восстановления эксплуатационных качеств зданий. – М.: Стройиздат, 1975. – 334 с.

REFERENCES

1. Vasil'ev, A.A. (2021). *Otsenka i prognozirovanie fizicheskogo iznosa stroitel'nykh konstruktsii, zdanii i sooruzhenii*. Gomel: BelGUT. (In Russ.).
2. Roitman, A.G. (1985). *Nadezhnost' konstruktsii ekspluatiruemykh zdanii*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
3. Golovina, N.V. & Shmelev, G.D. (2016). Sravnitel'nyi analiz nelineinykh modelei prognozirovaniya ostatochnogo resursa i rabotosposobnosti konstruktivnykh elementov zhilykh zdanii [Comparative analysis of nonlinear models for predicting the residual life and performance of structural elements of residential buildings]. *Vestnik MGSU [Vestnik MGSU], (5),* 10–15. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Gavril'ev, I.M., Korol'kov, D.I. & Gravit, M.V. (2019). Modifitsirovannaya metodika rascheta ostatochnogo resursa s ispol'zovaniem eksponentsial'nogo raspredeleniya [Modified method for calculating the residual resource using exponential distribution]. *Vestnik Evraziiskoi nauki [Bulletin of Eurasian Science], 11(2),* 1–14. (In Russ., abstr. in Engl.).

5. Popova, O.N. & Simankina, T.L. (2013). Metodika otsenki resursa rabotosposobnosti konstruktivnykh elementov zhilykh zdanii [Methodology for assessing the performance resource of structural elements of residential buildings]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal [Engineering and construction magazine], (7),* 40–48. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Belykh, A.V. (2013). Metodika opredeleniya velichiny fizicheskogo iznosa nezhilykh zdanii dlya tselei massovoi otsenki [Methodology for determining the amount of physical deterioration of non-residential buildings for the purposes of mass assessment]. *Zhurnal pravovykh i ekonomicheskikh issledovanii [Journal of Legal and Economic Research], 2,* 78–86. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Vasil'ev, A.A. (2009). Rol' fizicheskogo iznosa i ego otsenki v sisteme tekhnicheskoi ekspluatatsii zdanii [The role of physical wear and its assessment in the system of technical operation of buildings]. *Vestnik BelGUTa: Nauka i transport [Bulletin of BelSUT: Science and transport], 2(19),* 72–79. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Vasil'ev, A.A., Yan'shina, D.A. & Khramova, A.A. (2021). Prognozirovanie fizicheskogo iznosa zhelezobetonnykh elementov i konstruktsii dlya razlichnykh tipov zdanii i sooruzhenii [Prediction of physical deterioration of reinforced concrete elements and structures for different types of buildings and structures] (149–160). In G.Yu. Gulyaev (Eds.). *Nauka, innovatsii, obrazovanie: aktual'nye voprosy i sovremennye aspekty [Science, innovations, education: topical issues and modern aspects]*. Penza: Nauka i Prosveshchenie. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Simankina, T.L. & Shirko, N.V. (2011). Otsenka fizicheskogo iznosa zdanii s primeneniem vizual'nogo modelirovaniya defektov [Estimation of physical deterioration of buildings using visual modeling of defects]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Edicational Institutions. Construction], 7(633),* 91–97. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Sokolov, V.A. (2014). Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya i fizicheskogo iznosa stroitel'nykh konstruktsii s ispol'zovaniem veroyatnostnykh metodov tekhnicheskoi diagnostiki [Evaluation of the technical condition and physical wear of building structures using probabilistic methods of technical diagnostics]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Edicational Institutions. Construction], 1(661),* 94–100. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Tararushkin, E.V. (2016). Primenenie nechetkoi logiki dlya otsenki fizicheskogo iznosa nesushchikh konstruktsii zdanii [The use of fuzzy logic to assess the physical wear of the supporting structures of buildings]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova [Vestnik BSTU im. V.G. Shukhov], (10),* 77–82. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Vasil'ev, A.A., Yan'shina, D.A., Kabysheva, Yu.K., Leonov, N.A. & Sedun, E.V. (2022). Otsenka postoyannoi fizicheskogo iznosa zhelezobetonnykh elementov i konstruktsii dlya razlichnoi agressivnosti ekspluatatsionnoi sredy [Assessment of constant physical wear of reinforced concrete elements and structures for different aggressiveness of operating environment] (94–108). In G.Yu. Gulyaev (Eds.). *Nauka, obshchestvo, obrazovanie v epokhu tsifrovizatsii i global'nykh izmenenii [Science, society, education in the era of digitalization and global change]*. Penza: Nauka i Prosveshchenie. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Pukhonto, L.M. (2004). *Dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstruktsii inzhenernykh sooruzhenii (silosov, bunkerov, rezervuarov, vodonapornykh bashen, podpornykh sten)*. Moscow: ASV. (In Russ.).
14. Boiko, M.D. (1975). *Diagnostika povrezhdenii i metody vosstanovleniya ekspluatatsionnykh kachestv zdanii*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).

Поступила 09.02.2023

PREDICTION OF RESIDUAL RESOURCE REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES BY THE DEPENDENCE OF PHYSICAL WEAR

A.A. VASILIEV
(Belarusian State University of Transport, Gomel)

The article shows the relevance of the assessment of physical deterioration (PD) of elements and structures of buildings and structures. The drawbacks of existing time-based PD prediction techniques are shown. The need to develop PD models for various types of structures and operational conditions is justified. The logistic dependence of the ultimate service life of civil structures on PD indicators is considered. A study of the forecast dependence of PD for concrete and reinforced concrete structures based on the logistic trend was carried out. Coefficients are proposed that increase objectivity of using logistic dependence of prediction of concrete elements, reinforced concrete elements and structures. Values of constant wear (λ) for different time intervals, as well as weighted average values (λsr) for different types of iron-concrete elements and operating conditions were obtained. The obtained values of constant wear were analyzed with existing ones.

Keywords: *physical wear, concrete elements, reinforced concrete elements and structures, logistic dependence, permanent wear.*

УДК 624.078.4:004.94 **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-39-44**

АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANSYS

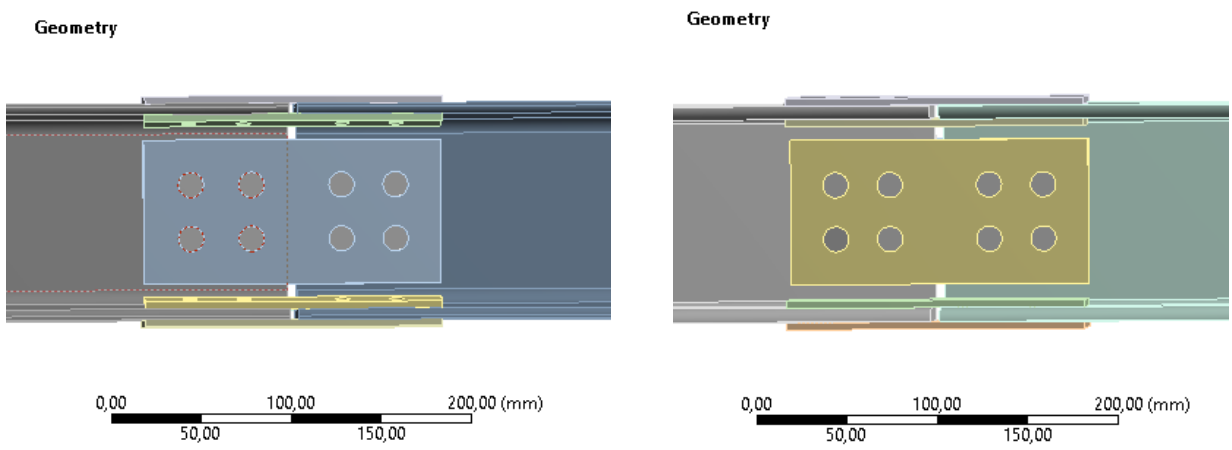
канд. физ.-мат. наук Т.М. МАРТЫНЕНКО,
канд. техн. наук, доц. О.О. СМИЛОВЕНКО,
В.А. МАКСИМОВИЧ, М.В. МЕЛЮХ
(Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск)

В статье исследована прочность наиболее распространенных в практике строительства сварного и болтового соединений, нагруженных сосредоточенной силой, приложенной вдоль оси соединительной накладки. Рассмотрено влияние конструктивного исполнения узловых соединений на напряженно-деформированное состояние пространственной конструкции из стержней открытого профиля и возникающих крутящих воздействий в зависимости от вида закрепления элементов. Расчет конструкции сводится к определению напряжений и перемещений в узлах закрепления, по которым затем определяют изменение механических характеристик стали.

Ключевые слова: *стержень открытого профиля, узлы сопряжения соединяемых элементов, местное увеличение жесткости, болтовое соединение, сварное соединение, деформирование накладок в соединении.*

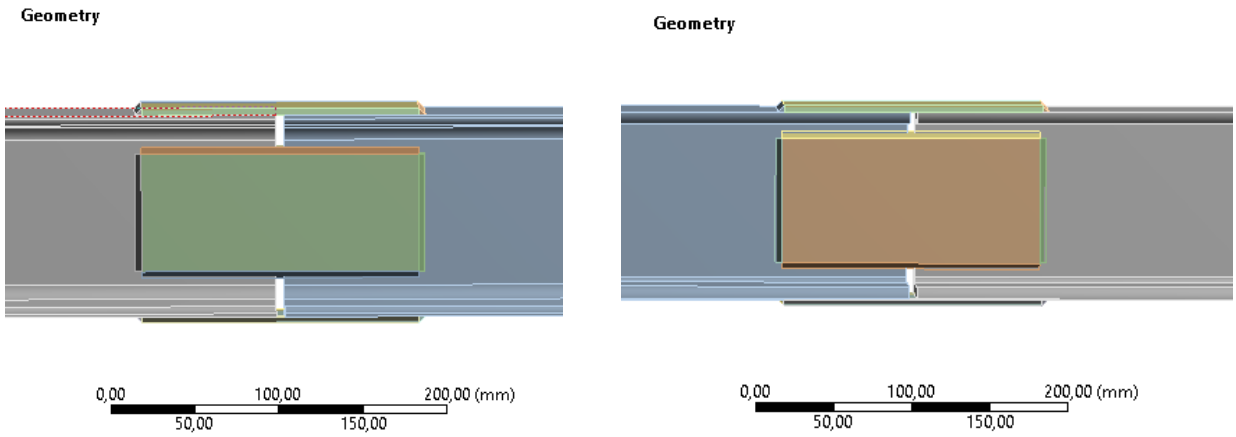
Введение. Здания и сооружения, каркас которых выполнен из стержней открытого профиля, широко применяются как торгово-развлекательные центры, промышленные, складские и прочие объекты. Применение таких конструкций из открытого профиля, называемых фермами, обусловлено быстрыми темпами возведения в сочетании с высокой технологичностью, эксплуатационной надежностью и долговечностью, минимальным количеством узлов сопряжения. Обладая указанными преимуществами, фермы в то же время не застрахованы от аварий, которые вызваны разрушением узлов [1; 2]. Это объясняется тем, что несущая способность ферм в большей мере определяется прочностью узловых соединений, которые воспринимают поперечные усилия, равномерно распределяют их по стержням пояса, за счет чего увеличивают жесткость всей конструкции. Местное увеличение жесткости узла влияет на изгиб стержневой конструкции фермы, формирует сложную картину полей остаточных напряжений, зон с повышенной структурно-механической неоднородностью. Как установлено [3; 4], разрушение узлов связано со снижением пластических свойств стали при наличии значительных концентраций напряжений, возникающих вследствие передачи усилий от сжатого элемента к растянутому, и через пояс фермы на сварные швы и болтовые соединения. Целью исследования является повышение надежности каркасных конструкций на основе результатов компьютерного моделирования напряженного состояния узловых соединений ферм. Разработаны объемные модели узлов, выполненных из двутаврового и таврового профилей, для соединения которых использовались либо болтовые соединения, либо сварные швы. Для оценки влияния узлов на работоспособность конструкции выполнен численный эксперимент.

Экспериментальные исследования. Исследована конструкция узла в виде прямого стыкового соединения с накладкой. Для создания трехмерной модели конструкции использован программный комплекс Autodesk Inventor Professional, который позволяет работать со сборкой из твердых тел, находящихся в параметрических зависимостях между собой, что дает возможность варьировать геометрические параметры конструкции при проведении модельных экспериментов (рисунок 1). Далее был произведен экспорт в ANSYS [5; 6].

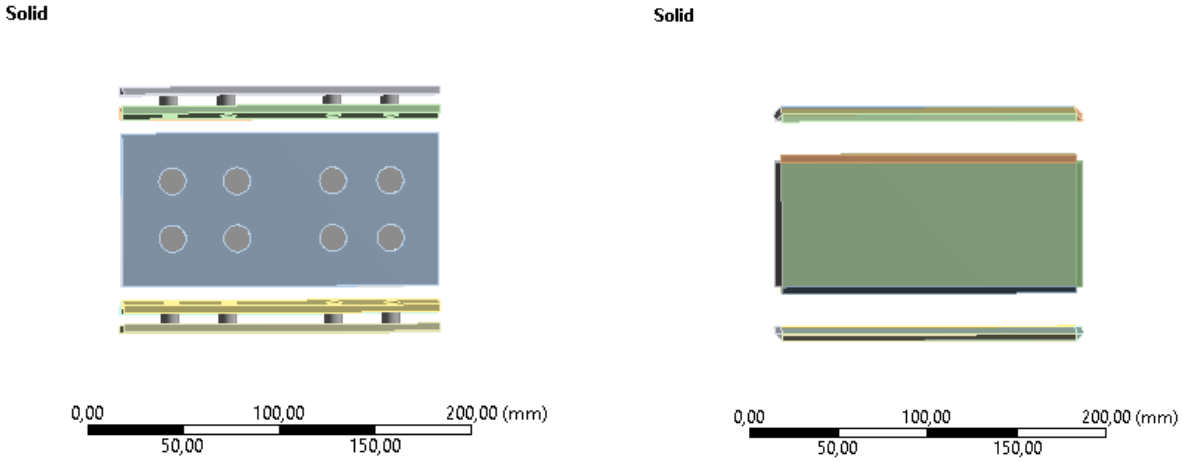


а **– модель болтового соединения двутаврового и таврового соединений балки**

Рисунок 1. – Вид объемной модели (начало)



б **– модель сварного соединения двутаврового и таврового соединений балки**

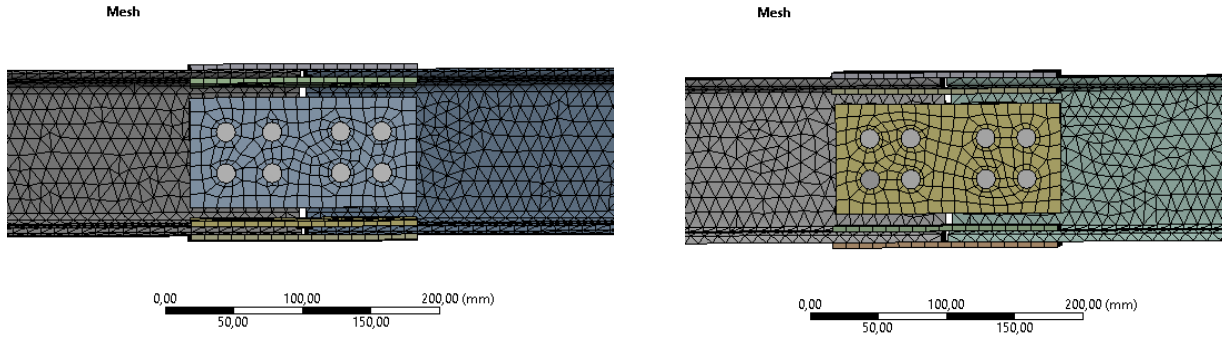


в **– модель накладок соединения**

Рисунок 1. – Вид объемной модели (окончание)

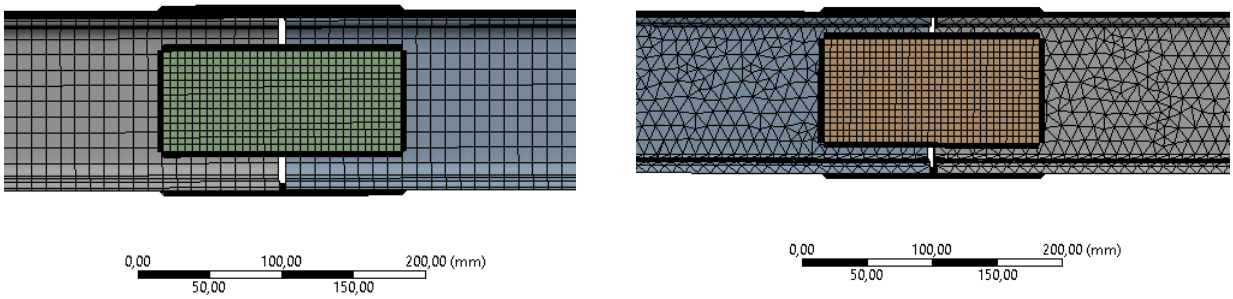
Переходим от тел к конечным элементам, для чего нужно выбрать характерный размер элемента, форму элемента, способы разбиения. Для моделирования объёмных сплошных тел ANSYS Workbench по умолчанию использует 3D элементы типа SOLID186 и SOLID187. Конечный элемент SOLID186 – трехмерный элемент объёмного напряженно-деформированного состояния (НДС) с двадцатью узлами, при этом каждый узел обладает шестью степенями свободы – три перемещения вдоль осей и три поворота вокруг осей узловой системы координат. Конечный элемент SOLID187 – трехмерный элемент объемного напряженно-деформированного состояния с десятью узлами в форме тетраэдра, при этом каждый узел обладает тремя степенями свободы – три перемещения вдоль осей узловой системы координат. Элементы SOLID186 и SOLID187 возможно использовать как в задачах с линейной постановкой, так и в задачах с нелинейной постановкой с большими деформациями [7]. Конечные элементы имеют произвольную ориентацию в пространстве и обладают свойствами пластичности, ползучести, гиперупругости, изменения жесткости под действием нагрузок.

Исследуемая конечно-элементная модель включала 53 676 конечных элементов двух основных типов: SOLID186 (трехмерный НДС призматической формы с двадцатью узлами) и SOLID187 (трехмерный элемент объемного НДС с десятью узлами в форме тетраэдра), средний «габаритный» размер соединения составлял 1 мм, открытый профиль 5 мм (рисунок 2) [8].

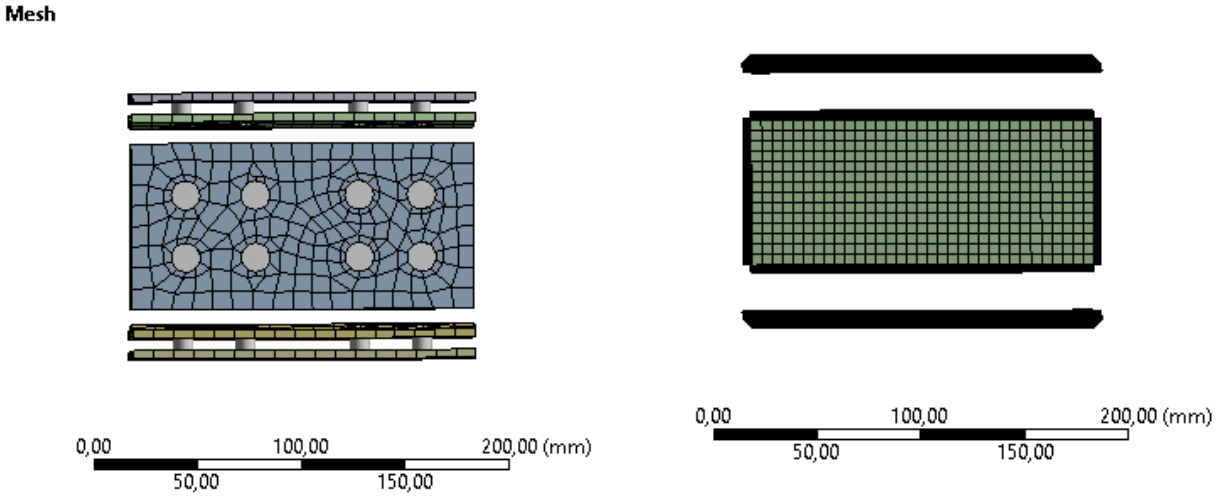


а **– вид конечно-элементной модели болтового соединения двутавровой и тавровой балки**

Рисунок 2. – Объемный вид конечно-элементной модели (начало)



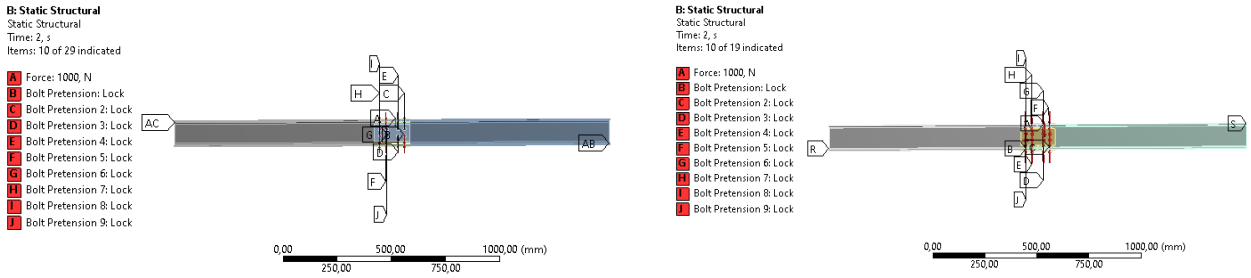
***б* – вид конечно-элементной модели сварного соединения двутавровой и тавровой балки**



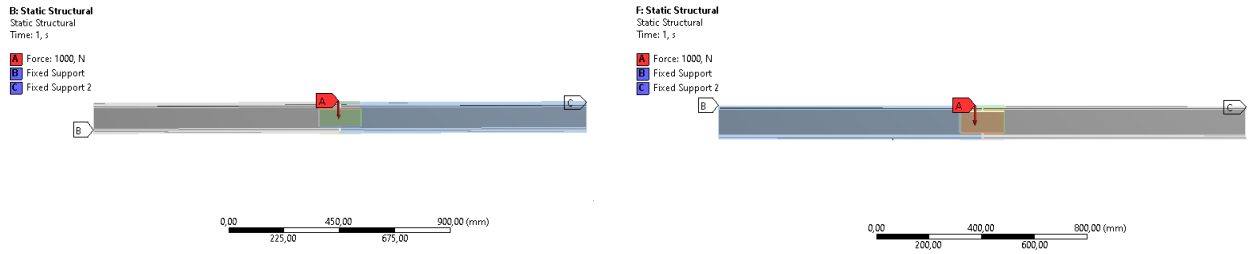
***в* – конечно-элементная модель накладок соединения**

Рисунок 2. – Объемный вид конечно-элементной модели (окончание)

Предусмотрен следующий вид нагружения исследуемого объекта: концы балки жестко закреплены, приложена нагрузка вдоль соединительной накладки. Задание граничных и начальных условий, выбор физической модели расчета – препроцессинг программы. Края конструкции жестко заделаны для болтового таврового и двутаврового соединений в точках (AB, AC, R, S), для сварных соединений в точках (B, C). Точка (A) – место приложения нагрузки в 1 кН (рисунок 3).



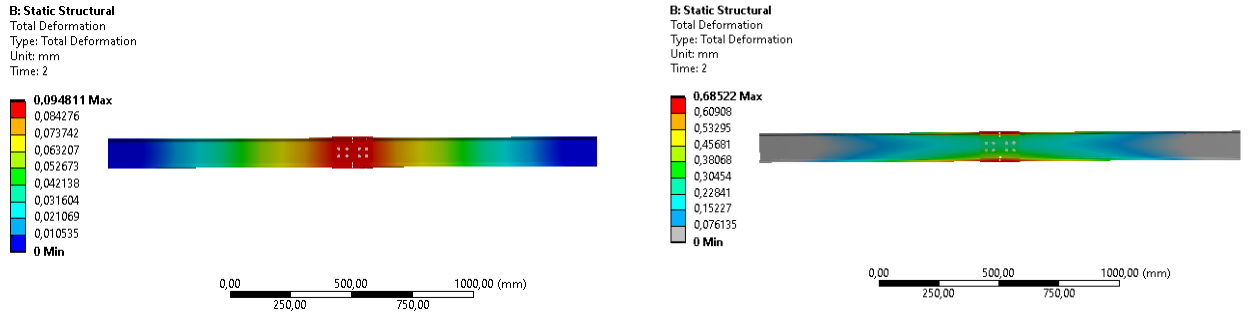
***а* – модель болтового двутаврового и таврового соединений, нагрузка приложена вдоль соединительной накладки**



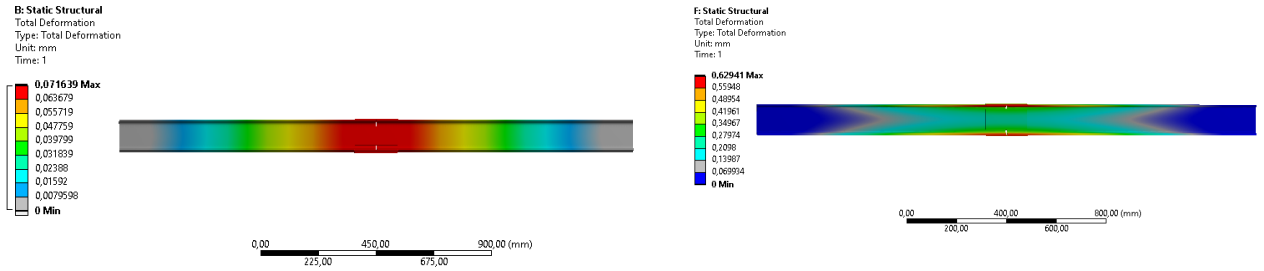
***б* – модель сварного двутаврового и таврового соединений, нагрузка приложена вдоль соединительной накладки**

Рисунок 3. – Физическая модель расчета

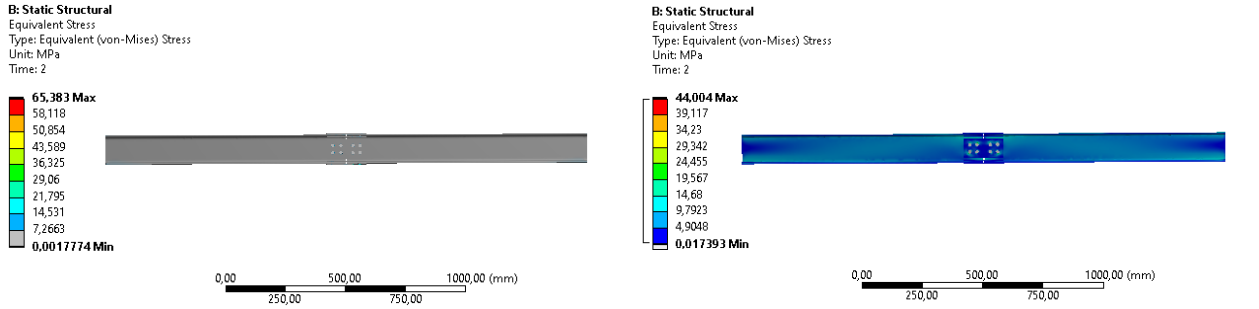
Для данной конечно-элементной модели проводим статический расчет конструкции, оцениваем распределение как нормальных, так и эквивалентных напряжений, выделяем значения относительных удлинений и полных перемещений (рисунок 4).



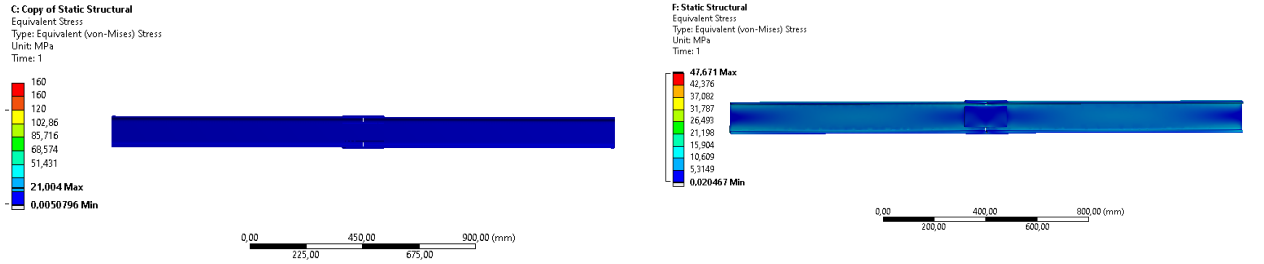
а **– схема деформирования болтового двутаврового и таврового соединений**



б **– схема деформирования сварного двутаврового и таврового соединений**



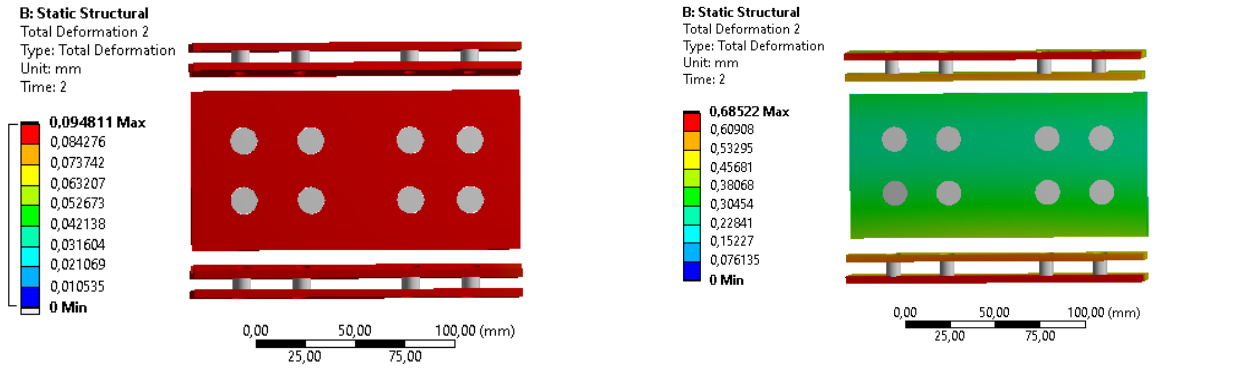
в **– схема напряжения болтового двутаврового и таврового соединений**



г **– схема напряжения сварного двутаврового и таврового соединений**

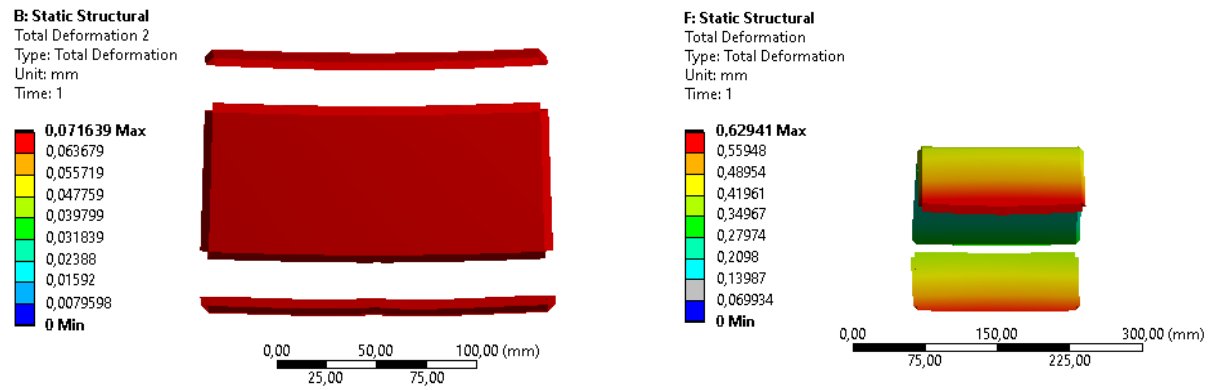
Рисунок 4. – Результаты статического расчета двутаврового и таврового соединений

Затем проводим статический расчет накладки, оцениваем относительное удлинение и полное перемещение в областях образования деформации (рисунок 5).

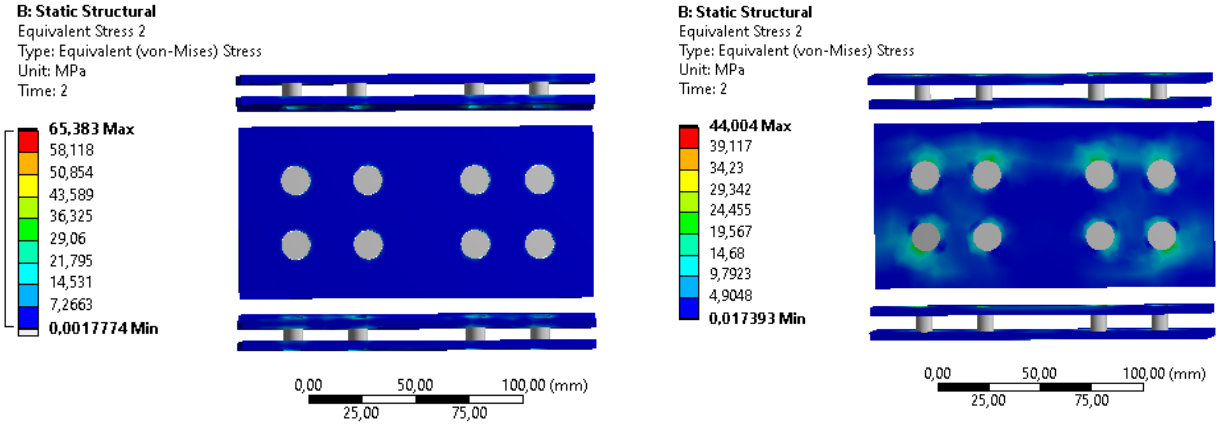


а **– схема деформирования болтовой накладки двутаврового и таврового соединений**

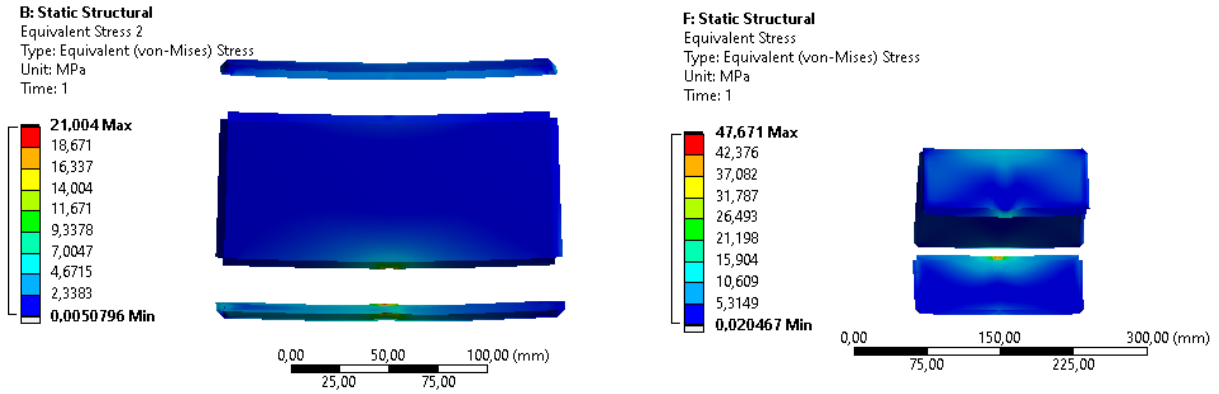
Рисунок 5. – Результаты статического расчета накладок таврового и двутаврового соединений (начало)



б **– схема деформирования сварной накладки двутаврового и таврового соединений**



в **– схема напряжения болтовой накладки двутаврового и таврового соединений**



г **– схема напряжения сварной накладки двутаврового и таврового соединений**

Рисунок 5. – Результаты статического расчета накладок таврового и двутаврового соединений (окончание)

Испытания в среде ANSYS проведены для сварного и болтового узлов соединения тавровой и двутавровой балки. Показан характер передачи усилий в рассмотренных узлах, учтены конструктивные особенности сварных и болтовых узлов. Результаты статического расчета показали: максимальное линейное перемещение наблюдается в тавровом болтовом соединении, двутавровое болтовое соединение лучше воспринимает нагрузку ввиду ее равномерного распределения по накладке. Сварное соединение тавровой балки хуже воспринимает изгибающий момент, в результате чего могут возникнуть хрупкие трещины, ведущие к уменьшению жесткости соединения.

Заключение. Исследовано состояние узлов фермы из стержней открытого профиля с различными типами узловых соединений, нагруженных сосредоточенной силой, приложенной вдоль соединительной накладки.

Определены напряжения и перемещения в узлах соединения, показаны области изменения механических характеристик стали, влияющие на прочность и жесткость рассматриваемой конструкции. Получена картина напряженно-деформированного состояния болтового и сварного соединений узла. Выявлены наиболее вероятные зоны изменения пластических свойств стали, однако зон напряжений, близких к критическим, не обнаружено, при этом за критическое напряжение принято характерное для строительных конструкций расчетное сопротивление R_y = 235 МПа для прокатного профиля.

Установлено, что высокая жесткость узловых соединений приводит к уменьшению продольных усилий в стержнях, но в то же время вызывает дополнительные напряжения от изгибающих моментов, причем сварной узел обладает большей жесткостью, в отличие от болтового (см. рисунок 4, *б*). Удлинение в двутавровом узле с болтовым соединением составляет 0,09 мм, а в аналогичном сварном – 0,07 мм. Разница в 20% объясняется большей стыковой податливостью болтового соединения по сравнению со сварным.

Полученные результаты являются первичными и определяют направление дальнейших исследований напряженного состояния узловых конструкций ферм при различных видах нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
2. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. – М.: Высш. Шк., 1986. – 607 с.
3. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 618 с.
4. Лещенко А.П. Фундаментальная строительная механика упругих систем. – М.: ЛКИ, 2008. – 976 с.
5. Дьяков И.Ф., Чернов С.А. К расчету оболочки, укрепленной тонкостенными стержнями // Автоматизация и современные технологии. – 2008. – № 1. – С. 16–20.
6. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под ред. Д.Г. Красковского. – М.: Компьютер-Пресс, 2002. – 223 с.
7. Конструирование зданий и сооружений. Легкие стальные тонкостенные конструкции: учеб. пособие / Н.И. Ватин, Е.Н. Жмарин, В.Г. Куражова и др. – СПб.: Политехн. ун-т, 2012. – 266 с.
8. Икрин В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности: учеб. – М: АСВ, 2004. – 424 с.

REFERENCES

1. Vol'mir, A.S. (1967). *Ustoichivost' deformiruemykh sistem*. Moscow: Nauka. (In Russ.).
2. Darkov, A.V. & Shaposhnikov, N.N. (1986) *Stroitel'naya mekhanika*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
3. Perel'muter, A.V. & Slivker, V.I (2002). *Raschetnye modeli sooruzhenii i vozmozhnost' ikh analiza*. Moscow: DMK Press. (In Russ.).
4. Leshchenko, A.P. (2008). *Fundamental'naya stroitel'naya mekhanika uprugikh sistem*. Moscow: LKI. (In Russ.).
5. D'yakov, I.F. & Chernov, S.A. (2008). K raschetu obolochki, ukreplennoi tonkostennymi sterzhnyami. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii, (1),* 16–20. URL: https://library.bmstu.ru/Catalog/Details/184565. (In Russ.).
6. Basov, K.A. & Krasovskii, D.G. (Eds.) (2002). *ANSYS v primerakh i zadachakh*. Moscow: ComputersPress. (In Russ.).
7. Vatin, N.I., Zhmarin, E.N., Kurazhova, V.G., Usanova, K.Yu. (2012). *Konstruirovanie zdanii i sooruzhenii. Legkie stal'nye tonkostennye konstruktsii: ucheb. posobie*. St. Petersburg: Polytechn. un-t. (In Russ.).
8. Ikrin, V.A. (2004). *Soprotivlenie materialov s elementami teorii uprugosti i plastichnosti: ucheb*. Moscow: ASV. (In Russ.).

Поступила 06.02.2023

ANALYSIS OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF KNOT CONNECTIONS IN BUILDING STRUCTURES BASED ON ANSYS SIMULATION

T. MARTYNENKO, O. SMILOVENKO, V. MAXIMOVICH, M. MELUKH
(The University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk)

The most common cross-section – the joining of two symmetrical I-beams – is investigated in this work. The transmission of force on the node connection in the form of a multi-bolt connection, welded connection, welded connection through the lining is modeled. The effect of node connections on the stress-strain state of the spatial structure made of thin-walled open section rods, torsional effects depending on the fastening of the elements is studied. The calculation of the structure is reduced to the determination of the stresses and displacements in the fastening nodes, by which the change in the mechanical characteristics of steel is then determined.

Keywords: *open profile rod, joints of joined elements, local stiffening, bolted joint, welded joint, deformation of overlays in the joint.*

УДК 697.341 **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-45-53**

ВЫБОР ИСТОЧНИКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. А.М. НИЯКОВСКИЙ,
Д.В. ЛАРИНА, А.В. БАТЕНКОВА
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Разработана система научно обоснованных критериев, позволяющих выполнять оценку и оптимизацию работы источников систем теплоснабжения с учетом их энергетической эффективности, вида используемых первичных энергоносителей и эмиссии CO_2 в атмосферу.

С использованием разработанной системы критериев выполнены численные исследования и получены новые результаты, показывающие количественную взаимосвязь между степенью термодинамической эффективности источника системы теплоснабжения, видом используемого первичного топлива или первичного энергоносителя и объемом эмиссии CO_2.

На основании результатов численных исследований разработаны научно обоснованные рекомендации по выбору источника теплоснабжения в системах теплоснабжения с целью обеспечения высокой эффективности использования энергии первичного топлива и энергоносителей при одновременном сокращении объемов выброса диоксида углерода.

Ключевые слова: *парниковые газы, декарбонизация, углеродная нейтральность, энергетическая эффективность, тепловая генерация, численные исследования, оптимизация выбора.*

Введение. Обеспечение рационального использования и экономного расходования энергетических ресурсов относится к важнейшим задачам, способствующим укреплению экономической безопасности государства. Этот принцип нашел отражение в Директиве Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 «О приоритетных направлениях укрепления экономической безопасности государства» (В редакции Указа Президента Республики Беларусь от 26.01.2016 г. № 26), который содержит требование о необходимости принятия соответствующих мер по экономии и бережливому использованию топливно-энергетических ресурсов во всех сферах производства, в том числе в строительстве и в жилищно-коммунальном хозяйстве[1].

Однако этот комплекс задач должен решаться с учетом требований Киотского протокола и Парижского соглашения к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата[2], к которому присоединилась Республика Беларусь и который предполагает сокращение выброса парниковых газов и, в частности, CO_2 в атмосферу с целью уменьшения антропогенного воздействия на природную среду.

Выполненный анализ научно-технической литературы показал, что разработка и обоснование методов повышения термодинамической эффективности преобразования первичной энергии в тепловую для целей теплоснабжения должны осуществляться с учетом эмиссии парниковых газов в атмосферу, влияние которой в данном контексте исследовано еще не в полной мере. В силу этого разработка научно-методических основ выбора источников тепловой энергии в системах теплоснабжения, базирующихся на реализации такого подхода, является актуальной, чему и посвящена настоящая работа.

Цель исследования: разработать научно-обоснованные рекомендации по выбору вида топлива и характеристик источников теплоснабжения, обеспечивающие снижение потребления первичного органического топлива и, как следствие, сокращение эмиссии парниковых газов в окружающую природную среду.

Объект исследования: системы теплоснабжения.

Предмет исследования: энергетическая и экологическая эффективность тепловой генерации.

Теоретическая часть. Объем эмиссии CO_2 за некоторый заданный период времени в общем случае, основываясь на имеющихся физических и термодинамических представлениях, можно представить в виде обобщенной функции, выражающей качественную зависимость величины эмиссии от объема конечного потребления тепловой энергии абонентами системы теплоснабжения, эффективности преобразования первичного топлива в тепловую энергию в теплогенерирующем оборудовании источника теплоснабжения и удельной эмиссии CO_2, присущей используемому топливу или энергоносителю.

$$M_{CO_2} = \frac{W_{fec} + \Delta W_{los}}{\eta_{hg}} \cdot K_{CO_2}, \quad (1)$$

[1] Директива Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 «О приоритетных направлениях укрепления экономической безопасности государства» (В редакции Указа Президента Республики Беларусь от 26.01.2016 г. № 26. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 28.01.2016, 1/16252).

[2] Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 29 сентября 2021 г. № 553 «Об установлении определяемого на национальном уровне вклада Республики Беларусь в сокращение выбросов парниковых газов до 2030 года».

где M_{CO_2} – общий объем эмиссии CO_2 в течение заданного периода времени;

W_{fec} – объем конечного потребления энергии потребителями в течение заданного периода времени;

W_{los} – потери энергии при передаче от источника к потребителям в течение заданного периода времени;

η_{hg} – эффективность преобразования энергии первичного энергоносителя на источнике теплоснабжения;

K_{CO_2} – удельный выход CO_2 на единицу расхода энергии использованного первичного топлива или энергоносителя.

В данном контексте понятие «первичный энергоноситель» означает вид энергии, используемый для получения тепловой энергии на источнике теплоснабжения, например, электрическая энергия, а понятие «первичное топливо» относится к топливу, сжигаемому непосредственно на источнике теплоснабжения для получения тепловой энергии. При дальнейшем изложении оба эти понятия при необходимости будут объединены в одно: «первичные энергоносители».

Все величины, входящие в уравнение (1), могут быть однозначно определены, исходя из сведений о виде первичного энергоносителя, виде системы теплоснабжения, коэффициенте преобразования энергии и величине теплового потребления абонентами системы теплоснабжения за какой-либо наперед заданный период времени. Как следует из этой качественной зависимости, при известном конечном потреблении тепловой энергии снижения объёма эмиссии CO_2 можно добиться, используя первичные энергоносители с большей степенью углеродной нейтральности и/или теплогенерирующее оборудование с более высокой термодинамической эффективностью преобразования энергии.

Эмиссия CO_2 в системах теплоснабжения обусловлена главным образом сжиганием органического топлива на источниках теплоты либо использованием электрической энергии, на производство которой также расходуется органическое топливо. В зависимости от вида системы теплоснабжения – централизованной или децентрализованной – могут применяться источники тепловой энергии, различающиеся способом получения энергии, видом используемых при этом топлива и энергоносителей, техническими и технологическими особенностями теплогенерирующего оборудования.

Существуют и широко применяются для целей теплоснабжения два основных варианта получения тепловой энергии:

1) в результате сжигания топлива (когенерационный и раздельный способы выработки тепловой и электрической энергии);
2) от природных возобновляемых источников (от солнца, из теплоты грунта, использование энергии падающей воды).

Когенерационная выработка предполагает получение электрической энергии на базе теплового потребления в результате использования энергии первичного топлива на едином источнике. При раздельной выработке электрическая и тепловая энергия вырабатывается на разных источниках, не имеющих между собой термодинамической связи: электрическая энергия генерируется на конденсационных электрических станциях (КЭС), потребляющих различные виды первичного топлива, а тепловая энергия – в разнообразных теплогенерирующих установках (ТГУ). Термодинамическая эффективность раздельного получения тепловой и электрической энергии значительно ниже, чем при совместной их выработке. В итоге удельные затраты первичного топлива на генерацию при совместной выработке энергии существенно ниже, а эксергетический КПД значительно выше, чем при раздельной её выработке [1]. Использование для тепловой генерации сбросных тепловых потоков различных энерготехнологических процессов – вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) – повышает термодинамические КПД самих этих процессов, что также ведет к снижению удельных показателей потребления первичного топлива [1].

В качестве основных видов первичного органического топлива, используемого в системах тепловой генерации, выступают:

1) природный газ;
2) мазут и котельно-печное топливо;
3) нефтяной сжиженный газ;
4) уголь;
5) биомасса (древесина, отходы ее заготовки и переработки).

Все эти виды топлива различаются теплотворной способностью, массой атомов углерода в общей массе топлива и, следовательно, объемами эмиссии CO_2, а также способом организации процесса их сжигания. В качестве первичного энергоносителя для выработки тепловой энергии на источниках теплоснабжения также может использоваться электрическая энергия. В этом случае эмиссия CO_2, связанная с выработкой электроэнергии на электростанциях, должна относиться на теплогенерирующее оборудование источника теплоснабжения рассматриваемой системы теплоснабжения.

Если в качестве первичного энергоносителя для целей тепловой генерации потребляются различные тепловые вторичные энергетические ресурсы (ВЭР), полученные ранее при организации каких-либо технологических или теплотехнических процессов, в ходе которых расходовались органическое топливо или электрическая энергия, то такое потребление тепловых ВЭР не приводит к дополнительной эмиссии CO_2, так как весь объем эмиссии ранее уже был отнесен к этим технологическим или теплотехническим процессам.

Методы оценки объемов выбросов парниковых газов при использовании органических топлив основываются на двух показателях: количестве сожженного топлива и содержании в нём углерода [2]. Для расчета выбросов парниковых газов от стационарного сжигания топлива необходимо иметь данные о количестве использованного топлива и о коэффициентах удельных выбросов парниковых газов на единицу массы сожжённого топлива или на единицу теплотворной способности топлива. При этом данные оценки основываются на том, что полнота сжигания топлива максимальна [2].

В результате анализа имеющейся научно-технической информации[3] и данных, приведенных в работе [3], выполнено обобщение в отношении удельной эмиссии CO_2 при сжигании различных видов топлива, результаты которого приведены на рисунке 1.

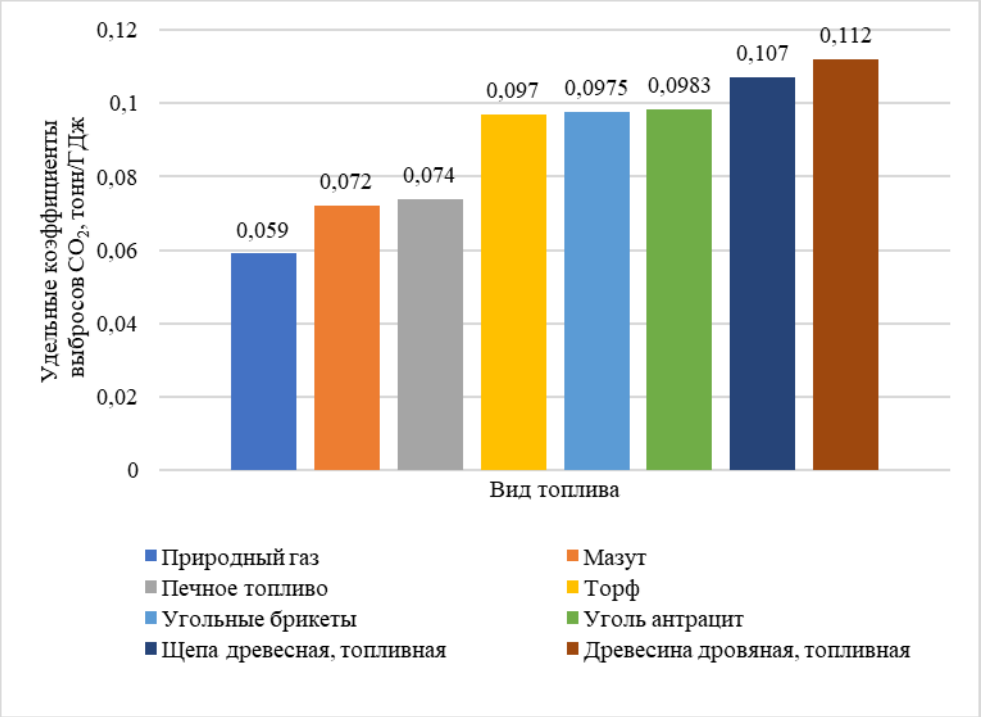


Рисунок 1. – Значения удельных коэффициентов эмиссии CO_2 для различных органических топлив

Как следует из гистограммы на рисунке 1, наименьшей удельной эмиссией CO_2 характеризуются природный газ, мазут и печное топливо, а наибольшей – древесное топливо разных видов.

Разработка критериев выбора. Критерии выбора вариантов теплоснабжения применительно к рассматриваемой задаче минимизации выбросов парниковых газов в окружающую среду в качестве требований к ним должны учитывать:

– вид топлива или первичного энергоносителя;

– степень централизации системы теплоснабжения и связанные с ней путевые тепловые потери;

– энергетическую эффективность преобразования первичной энергии на источнике теплоснабжения в тепловую энергию.

Согласно этому подходу в качестве комплексного критерия выбора может быть предложен следующий размерный комплекс, в значительной мере соответствующий сформулированным выше требованиям:

$$M_{Q,CO_2} = \frac{Q_{fec}}{\eta_{hg}\eta_{netw}} \cdot k_{\text{окисл}} \cdot K_{CO_2} \cdot (1-\psi)\,, \qquad (2)$$

где M_{Q,CO_2} – общий объем эмиссии CO_2 при тепловой генерации в течение заданного периода времени, тонн/период;

[3] Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Выбросы и поглощение парниковых газов. Правила расчета выбросов за счет внедрения мероприятий по энергосбережению, возобновляемых источников энергии: ТКП 17.09-01-2011 (02120). – Введ. 01.01.2012 (Введен впервые). – Минск: М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 2012. – 34 с.

Q_{fec} – объем конечного потребления тепловой энергии потребителями в течение заданного периода времени, ГДж/период;

ΔQ_{los} – потери тепловой энергии при передаче от источника к потребителям в течение заданного периода времени, ГДж/период;

η_{hg} – эффективность преобразования энергии первичного энергоносителя на источнике теплоснабжения в тепловую энергию;

η_{netw} – КПД системы транспорта тепловой энергии;

K_{CO_2} – удельный выход CO_2 на единицу расхода энергии использованного первичного топлива или энергоносителя при тепловой генерации, тоннСО$_2$/ГДж;

$k_{окисл}$ – коэффициент окисления углерода топлива, $k_{окисл}$ <1;

ψ – показатель, характеризующий степень углеродной нейтральности источника первичной энергии для целей тепловой генерации, принимающий значения от 0 до 1.

Предлагаемый в данной работе показатель углеродной нейтральности ψ должен оцениваться, исходя из следующих предпосылок: он принимается равным 1, если в качестве первичного энергоносителя для целей тепловой генерации используются тепловые ВЭР с достаточным температурным потенциалом, солнечная энергия, электрическая энергия, полученная от ветряных и/или солнечных электростанций, ГЭС и АЭС; в случае прямого сжигания органического топлива этот показатель будет равным нулю. При использовании электрической энергии, полученной от энергосистемы, а также при использовании низкопотенциальных тепловых ВЭР с применением тепловых насосов, имеющих электрический привод, показатель ψ принимает значения больше нуля, но меньше единицы в зависимости от удельного веса в энергетическом приходе углеродно-нейтральных компонентов.

В качестве показателя эффективности преобразования энергии первичного энергоносителя на источнике теплоснабжения в тепловую энергию может быть применен любой из показателей. Вместе с тем, учитывая, что коэффициент K_{CO_2} (удельный выход CO_2 на единицу расхода энергии использованного первичного топлива или энергоносителя при тепловой генерации, тоннСО$_2$/ГДж) в справочной литературе отнесен к низшей теплоте сгорания топлива, то коэффициент η_{hg} должен приниматься, исходя из анализа теплового баланса источника теплоснабжения.

Наряду с приведенным выше показателем, представленным в виде уравнения (2), могут быть использованы и другие зависимости. В частности, в [4] предложено для оценки объема эмиссии CO_2 при сжигании различных видов топлива использовать величину эмиссии, отнесенной к единице эксергии потока первичного энергоносителя, либо к величине использованной эксергии первичного энергоносителя, которая может рассматриваться как разность величины эксергетического потока энергоносителя на входе источника теплоснабжения и эксергии теплоты, отпущенной потребителям от коллекторов источника. Эти два потока связаны между собой через показатель эксергетического КПД источника теплоснабжения.

В такой интерпретации уравнение (2) может быть преобразовано к виду:

$$M_{Q,CO_2} = \frac{E_{fec}}{e \cdot \eta_{e,hg} \cdot \eta_{netw}} \cdot q_{LCV} \cdot k_{окисл} \cdot K_{CO_2} \cdot (1-\psi), \quad (3)$$

где E_{fec} – величина эксергии теплового потока конечного потребления тепловой энергии потребителями в течение заданного периода времени, ГДж/период;

e – удельная эксергия потока первичного энергоносителя, поступающего на источник теплоснабжения, ГДж/т;

$\eta_{e,hg}$ – эксергетический КПД$_e$ тепловой генерации;

q_{LCV} – удельная низшая теплотворная способность первичного энергоносителя, ГДж/т.

Остальные величины в уравнении (3) имеют тот же смысл, что и в уравнении (2).

Фигурирующая в приведённых выше уравнениях величина Q_{fec} применительно к некоторой системе теплоснабжения является функцией изменяющейся во времени тепловой нагрузки и времени отпуска тепловой энергии. В общем случае она может быть определена следующим образом [5–7]:

$$Q_{fec} = 3600\int_0^z Q dz = Q_{\max} \cdot \frac{3600}{k_{hr}^{\max}} \cdot z = 3600 \cdot Q_{\max} \cdot \bar{Q} \cdot z \text{, ГДж,} \quad (4)$$

где Q – мгновенная мощность конечного теплового потребления в данный момент времени, ГВт;

z – продолжительность периода времени отпуска тепловой энергии, ч;

$k_{hr}^{\max}$ – коэффициент часового максимума;

$\bar{Q}$ – относительная тепловая нагрузка в системе теплоснабжения.

Для случая, когда тепловое потребление состоит из расхода тепловой энергии на нужды обогрева зданий и на горячее водоснабжение, величина безразмерной относительной тепловой нагрузки системы теплоснабжения может быть определена по следующей предлагаемой нами зависимости:

$$\bar{Q} = \frac{Q_{hm} + Q_o^{\max} \cdot \left(t_{in} - t_{out}\right) \Big/ \left(t_{in} - t_{out}^{norm}\right)}{Q_{hm} + Q_o^{\max}}, \text{ ГДж}, \tag{5}$$

где Q_{hm} – средняя нагрузка горячего водоснабжения, ГВт;

$Q_o^{\max}$ – максимальный расчетный расход тепловой энергии на обогрев зданий, ГВт;

t_{in} – расчетная внутренняя температура обогреваемых помещений, °С;

t_{out} – фактическая температура наружного воздуха, средняя для рассматриваемого периода, °С;

t_{out}^{norm} – расчетная температура наружного воздуха для целей проектирования обогрева зданий, °С.

Первые два из перечисленных выше членов уравнения (5) являются проектными значениями. Расчетная внутренняя температура обогреваемых помещений для проектирования систем теплоснабжения принимается равной 18 °С[4]. Расчетная температура наружного воздуха для целей проектирования систем обогрева зданий принимается равной температуре наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92, сведения о которой содержатся в ТНПА.

Уравнения (3)–(5) представляют собой набор критериев и зависимостей, позволяющих выполнить оценку систем теплоснабжения с позиции их энергетической эффективности и углеродной нейтральности. Они составляют разработанное научно-методическое обеспечение, с помощью которого представляется возможным выполнять исследование различных систем теплоснабжения на эмиссию CO_2 в атмосферу.

Численные исследования модельных систем теплоснабжения. С использованием полученных критериев и зависимостей выполнен анализ энергетической эффективности и углеродной нейтральности различных модельных систем теплоснабжения равной тепловой мощности, но разного устройства, использующих различные виды энергоносителей. Дискретный ряд таких модельных систем и их характеристики для теплоснабжения района жилой застройки, в котором проживает около 10 тыс. человек, представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Варианты принятых к исследованию модельных систем теплоснабжения и их характеристика

№ варианта	Описание системы теплоснабжения	Тепловая мощность по конечному потреблению, Q_{fec}, ГВт	Вид топлива	КПД тепловой генерации, η_{hg}	КПД системы транспорта теплоты, η_{netw}
1	Централизованная	0,015	природный газ	0,92	0,9
2	Централизованная	0,015	мазут	0,91	0,9
3	Централизованная	0,015	уголь	0,75	0,9
4	Централизованная	0,015	дрова	0,6	0,9
5	Централизованная	0,015	тепловые ВИЭ и ВЭР, тепловой насос с СОР = 3	КПД генерации электроэнергии равен 0,385	0,9
6	Децентрализованная	0,015	природный газ	0,9	0,99
7	Децентрализованная	0,015	мазут	0,89	0,99
8	Децентрализованная	0,015	уголь	0,75	0,99
9	Децентрализованная	0,015	дрова	0,55	0,99
10	Децентрализованная	0,015	тепловые ВИЭ и ВЭР, тепловой насос с СОР = 3	КПД генерации электроэнергии равен 0,385	0,99

[4] Тепловые сети. Строительные нормы Республики Беларусь: СН 4.02.01-2019. – Введ. 09.07.2020 (Введены впервые). – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 43 с.

Варианты 5 и 10 предполагают потребление низкопотенциальных тепловых ресурсов (ВИЭ или ВЭР) с использованием теплового насоса, имеющего коэффициент преобразования электрической энергии в тепловую COP=3. В этом случае коэффициент ψ=2/3. При этом суммарный КПД генерации и транспорта электрической энергии принимается равным 0,385. Это значение соответствует удельным расходам топлива на отпуск и транспорт электрической энергии в Белорусской энергосистеме[5].

С использованием созданного научно-методического обеспечения и математической модели было выполнено сравнение различных вариантов систем теплоснабжения, описанных в таблице 1, по величине валового выброса CO_2 в окружающую среду при тепловой генерации. Временной период *z* для расчетов принят равным 5000 ч/год. Коэффициент окисления углерода топлива, учитывая сравнительный характер анализа, принят равным 1.

Расчеты выполнены для климатических условий города Новополоцка. Результаты расчетов представлены на рисунках 2 и 3 и в таблице 2.

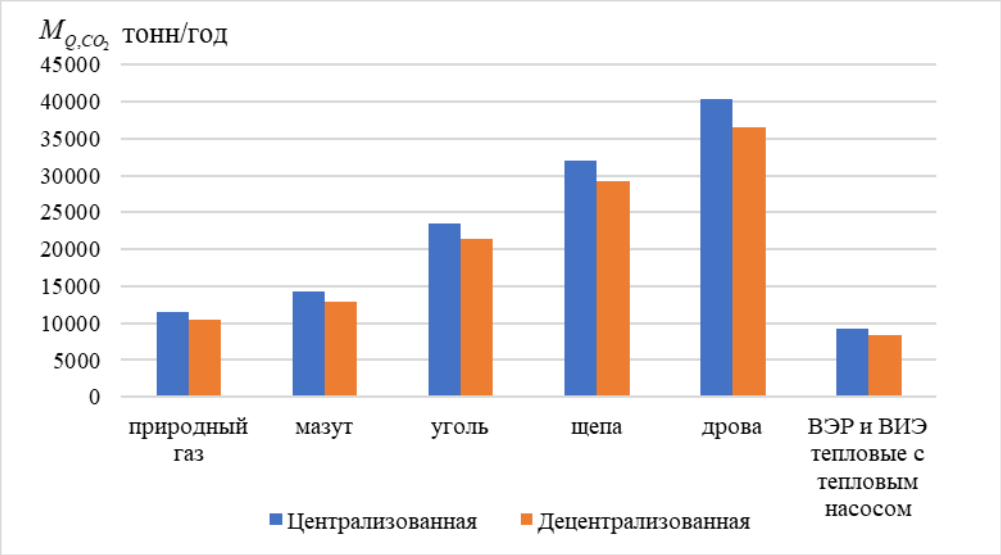


Рисунок 2. – Сравнительный анализ годовой эмиссии CO_2 для различных конфигураций модельной системы теплоснабжения при коэффициенте окисления $k_{окисл}$=1

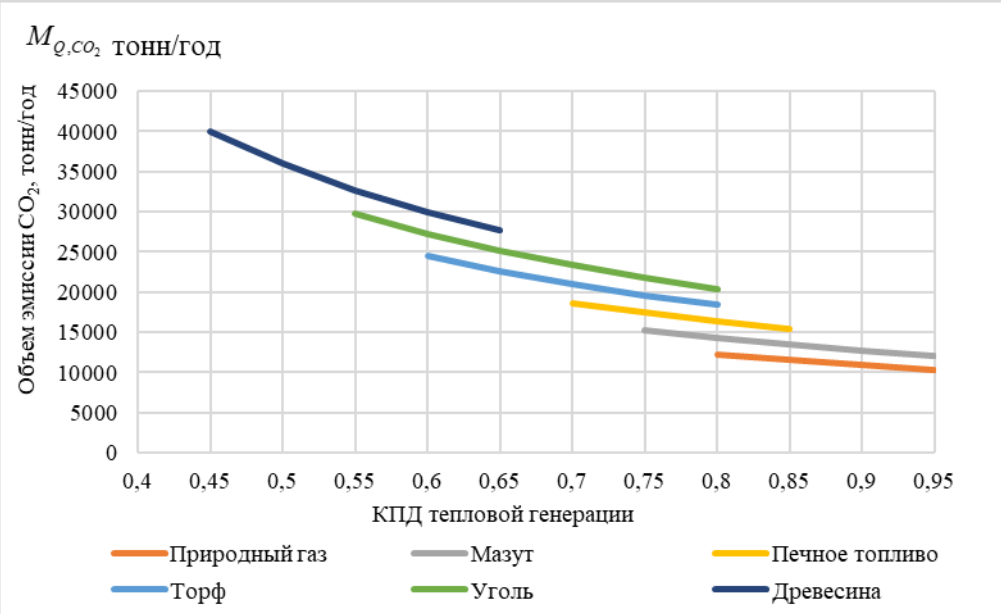


Рисунок 3. – Зависимость валового выброса CO_2 в окружающую среду от вида топлива и энергетической эффективности системы теплоснабжения при коэффициенте окисления $k_{окисл}$=1

[5] Удельные расходы топлива на отпуск электро- и теплоэнергии и потери в электро- и теплосетях, используемые в 2022 году в расчетах экономии топливно-энергетических ресурсов. URL: https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka/30230201_sprav.

Таблица 2. – Результаты расчетов параметров работы и величины эмиссии CO_2 для анализируемых модельных систем теплоснабжения, описанных в таблице 1, с использованием разработанной математической модели при коэффициенте окисления $k_{окисл}$=1 и времени работы системы 5000 часов

Показатель	Централизованная система						Децентрализованная система					
Вид топлива (энергоносителя)	природный газ	мазут	уголь	щепа	дрова	ВЭР и ВИЭ тепловые с тепловым насосом	природный газ	мазут	уголь	щепа	дрова	ВЭР и ВИЭ тепловые с тепловым насосом
Максимальная тепловая нагрузка, Q_{max}, ГВт	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Относительная тепловая нагрузка, $\bar{Q}$	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599
Конечное тепловое потребление, Q_{fec}, ГДж	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791
КПД тепловой генерации	0,92	0,91	0,75	0,6	0,5	0,385	0,92	0,91	0,75	0,6	0,5	0,385
КПД тепловой сети	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Удельный выход CO_2, K_{CO_2}, т/ГДж	0,059	0,072	0,098	0,107	0,112	0,059	0,059	0,072	0,098	0,107	0,112	0,059
Доля использования ВЭР и ВИЭ, ψ	0	0	0	0	0	0,667	0	0	0	0	0	0,667
Число часов отпуска тепловой энергии, z, ч/год	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
M_{Q,CO_2}, т/год	11529	14223	23490	32059	40268	9183	10481	12930	21354	29144	36607	8348

Обсуждение полученных результатов. Как следует из рисунка 2, валовой выброс CO_2 от централизованных систем теплоснабжения превышает таковой от децентрализованных систем, что объясняется существующими непроизводительными потерями энергии в централизованных системах, связанными с транспортом теплоносителя по тепловым сетям. Важно отметить, что использование в качестве источника энергии низкопотенциальных тепловых ВЭР или ВИЭ с применение тепловых насосов позволяет добиться снижения валового выброса CO_2 не менее чем на 20% по сравнению с любыми другими видами источников теплоснабжения и применяемых на них видах топлива.

Как следует из рисунка 3, для рассмотренных модельных систем теплоснабжения при равной величине конечного потребления тепловой энергии замена природного газа древесным топливом ведет к увеличению объема поступления CO_2 в окружающую среду с 10–15 тыс. тонн до 28–40 тыс. тонн в год, то есть в среднем почти в 3 раза.

Полученные результаты относятся к принятому при расчетах условию, что коэффициент окисления углерода топлива $k_{окисл}$=1. Для сравнительного анализа различных вариантов систем теплоснабжения такое допущение можно считать корректным. Вместе с тем, при оценке абсолютных показателей объемов эмиссии CO_2 величину этого коэффициента необходимо задавать, исходя из конкретных условий сжигания топлива. Очевидно, что существует взаимосвязь между КПД тепловой генерации и степенью окисления топлива, так как недостаточное окисление углерода в топливе объективно приводит к снижению КПД тепловой генерации. Низкий КПД тепловой генерации, как правило, связан с неполнотой сжигания топлива. Следует ожидать, что в случае учёта при расчётах реального значения коэффициента $k_{окисл}$ темпы роста валового выброса CO_2 при переходе от газообразного топлива к жидкому и/или к твердому будут несколько ниже, чем это следует из приведённых выше графиков. Тем не менее, общая полученная в данной работе картина при сравнении различных видов топлива не претерпит существенного изменения.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Разработана система критериев и зависимостей, позволяющая выполнять сравнение различных систем теплоснабжения по критерию эффективности и степени углеродной нейтральности:

– предложен критерий, связывающий величину конечного потребления тепловой энергии, энергоэффективность транспорта тепловой энергии, удельную эмиссию CO_2, долю использования углеродно-нейтральных энергетических источников и энергетическую эффективность тепловой генерации на источнике теплоснабжения;

– предложен критерий, связывающий эксергию теплового потока в объеме конечного потребления тепловой энергии потребителями, долю использования углеродно-нейтральных источников тепловой энергии, эффективность транспорта тепловой энергии от источника к потребителям и эксергетическую эффективность тепловой генерации на источнике с объемами эмиссии CO_2;

– сформулированы зависимости и подходы, позволяющие определить входящие в эти критерии величины.

2. Указанная система критериев и зависимостей может быть использована для оптимизации вариантов теплоснабжения с целью минимизации объемов потребления первичного топлива при одновременной минимизации валовых выбросов парниковых газов.

3. В результате применения разработанного научно-методического обеспечения и выполненного анализа модельных систем теплоснабжения установлено:

– переход от газообразного топлива к жидкому и твердому при неизменной величине конечного потребления тепловой энергии ведёт к росту валового выброса CO_2 по сравнению с газообразным топливом: для жидких топлив, в среднем, в 1,3 раза, для угля и торфа – в 1,9 раза, для древесного топлива – в 2,9 раза;

– объем эмиссии CO_2, отнесенный к 1 ГДж конечного теплового потребления, составляет для систем теплоснабжения, использующих природный газ, 0,064 тонн/ГДж, при использовании жидкого топлива – 0,08 тонн/ГДж, при использовании угля и торфа – 0,12 тонн/ГДж, при использовании древесного топлива – 0,19 тонн/ГДж;

– установлено, что коэффициент окисления углерода топлива является масштабом суммарной величины относительных потерь тепловой энергии в результате химической и механической неполноты сгорания и он снижается по мере перехода от газообразного топлива к жидкому, а от него – к углю, торфу и древесному топливу, причем минимальные величины этого коэффициента следует отнести к древесному топливу;

– показано, что при использовании в качестве источника теплоснабжения низкопотенциальных тепловых ВЭР и ВИЭ с применением компрессионных тепловых насосов валовой выброс CO_2 в окружающую среду по сравнению с источниками, использующими природный газ, снижается не менее чем на 20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
2. Илышева Н.Н., Балдеску Е.В. Совершенствование методического инструментария количественной оценки выбросов парниковых газов с учетом международного опыта // Вестн. УрФУ. Сер. Экономика и управление. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 108–126.
3. Степанов В.С, Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Определение химической энергии и эксергии древесных топлив // Системы. Методы. Технологии. – 2017 – № 1 (33). – С. 91–96.
4. Нияковский А.М. О некоторых аспектах выполнения эксергетического анализа теплоэнергетических систем с целью снижения выбросов CO_2 в окружающую среду // Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Витебск, 21–22 нояб. 2018 г. – Витебск: Витебский гос. технол. ун-т, 2018. – С. 259–261.
5. Теплоснабжение: учеб. для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков и др. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.
6. Теплоснабжение: учеб. пособие / В.Е. Козин, Т.А. Левина, А.П. Марков и др. – М.: Высш. шк., 1980. – 408 с.
7. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для втузов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоиздат, 1982. – 360 с.

REFERENCES

1. Brodyanskii, V.M. (1973). *Eksergeticheskii metod termodinamicheskogo analiza*. Moscow: Energiya. (In Russ.).
2. Ilysheva, N.N. & Baldesku, E.V. (2017). Sovershenstvovanie metodicheskogo instrumentariya kolichestvennoi otsenki vybrosov parnikovykh gazov s uchetom mezhdunarodnogo opyta [Improving methodological tools quantitative estimates of greenhouse gas emissions based on international experience]. *Vestn. UrFU. Ser. Ekonomika i upravlenie [Journal of applied economic resrarch], 16(1),* 108–126. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Stepanov, V.S, Stepanova, T.B. & Starikova, N.V. (2017). Opredelenie khimicheskoi energii i eksergii drevesnykh topliv [Determination of chemical energy and exergy of wood fuels]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [The system. Methods. Technologies], 1(33),* 91–96. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Niyakovskii, A.M. (2018). O nekotorykh aspektakh vypolneniya eksergeticheskogo analiza teploenergeticheskikh sistem s tsel'yu snizheniya vybrosov SO_2 v okruzhayushchuyu sredu. In *Innovatsionnye tekhnologii v tekstil'noi i legkoi promyshlennosti: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Vitebsk, 21–22 noyab. 2018 g*. (259–261). Vitebsk: Vitebskii gos. tekhnol. un-t. (In Russ.).
5. Ionin, A.A., Khlybov, B.M., Bratenkov, V.H., & Terletskaya, E.H. (1982). *Teplosnabzhenie: ucheb. dlya vuzov*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
6. Kozin, V.E., Levina, T.A., Markov, A.P., Pronina, I.B. & Slemzin, V.A. (1980). *Teplosnabzhenie: ucheb. posobie*. – Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
7. Sokolov, E.Ya. (1982). *Teplofikatsiya i teplovye seti: ucheb. dlya vtuzov*. Moscow: Energoizdat. (In Russ.).

Поступила 06.05.2023

THE CHOICE OF A SOURCE OF THERMAL ENERGY IN HEAT SUPPLY SYSTEMS, TAKING INTO ACCOUNT THE REQUIREMENTS OF DECARBONIZATION AND ENERGY CONSERVATION

A. NIYAKOVSKII, D. LARINA, A. BATENKOVA
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

A system of scientifically based criteria has been developed to evaluate and optimize the operation of heat supply systems sources, taking into account their energy efficiency, the type of primary energy carriers used and CO_2 emissions into the atmosphere.

Using the developed system of criteria, numerical studies were performed and new results were obtained showing a quantitative relationship between the degree of thermodynamic efficiency of the source of the heat supply system, the type of primary fuel or primary energy carrier used and the volume of CO_2 emissions.

Based on the results of numerical studies, scientifically based recommendations have been developed for the selection of a heat supply source in heat supply systems in order to ensure high efficiency of primary fuel and energy use while reducing carbon dioxide emissions.

Keywords: *greenhouse gases, decarbonization, carbon neutrality, energy efficiency, thermal generation, numerical studies, optimization of choice.*

УДК 628.11(628.16) **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-54-62**

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ЗАКАЧКИ ВОДЫ В ПОДЗЕМНЫЙ ПЛАСТ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЕЕ ОТКАЧКОЙ В СИСТЕМУ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Е.И. РАШКЕВИЧ[1)], канд. техн. наук В.Д. ЮЩЕНКО[2)], И.Г. САЛИВОНЧИК[3)]
([1), 2)]Витебское областное коммунальное унитарное предприятие водопроводно-канализационного хозяйства «Витебскоблводоканал»,
[3)]Министерство жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь, Минск)
[1)]selenapuko@gmail.com, [2)]yuvd46@mail.ru, [3)]ukx@mjkx.gov.by

В статье описываются технология и основные схемы закачки воды в подземный пласт с последующей откачкой в системы водоснабжения, опыт использования этого метода за рубежом и в Республике Беларусь.

Ключевые слова: *скважины и водоносный слой, качество воды, технология и особенности закачки воды в подземный пласт, применение метода за рубежом и в Республике Беларусь.*

Введение. Во многих странах нашей планеты в хозяйственно-питьевых целях используются артезианские подземные воды. Они отличаются, по сравнению с поверхностными водами, более высоким качеством и лучшей защитой от внешних воздействий[1,2]. Например, их доля в общем водопотреблении в странах Западной Европы составляет порядка 75%, в Азиатском регионе и России – более 30%, в США – 34%[3,4].

В Республике Беларусь снабжение водой всех населенных пунктов для удовлетворения различных нужд населения и организаций производится подземной водой (в г. Минске порядка 25% объема водопотребления города – поверхностные воды). Общее годовое водопотребление в 2021 г. составило 1,281 млрд м^3, причем в этот объем не включаются расходы воды в системах оборотного и последовательного водоснабжения, транзитная вода, а также повторно используемая сточная и дренажная вода[5,6].

Однако во многих случаях в подземной воде наблюдается повышенная концентрация железа, которое может быть в сочетании с другими загрязняющими элементами и веществами, например, с марганцем и аммонийными солями. Особенно это актуально для снабжения водой питьевого качества малых населенных пунктов. Согласно требованиям ВОЗ [1], в том числе и СанПиН 10.124-99 РБ, концентрация железа в воде питьевого качества должна быть не более 0,3 мг/дм^3. Высокая концентрация приводит к металлическому привкусу в воде, вызывает отложения в трубах и окраску санитарных приборов, отрицательно влияет на здоровье человека.

Традиционные станции в наземном исполнении по обработке подземных вод *ex-situ* основываются на химическом и биологическом окислении, либо часто на их совместном воздействии на удаляемые загрязнения[7] [2]. В этом случае вода из скважин подается на поверхность земли, и ее очистка производится в напорном или безнапорном варианте. Причем удаление загрязнений может быть с сочетанием различных методов, исходя из области их применения, технологичной и экономической целесообразности, а также надежности. Немаловажное значение имеют требования по квалификации обслуживающего персонала.

Типовые решения таких установок чаще всего основываются на методе упрощенной или интенсивной аэрации воды с одноступенчатым, реже двухступенчатым фильтрованием. Если достигнуть желаемых результатов невозможно, особенно в случае очень высоких концентраций загрязнений в исходных водах и при наличии различных их биокомплексов, то используются дополнительно методы реагентного окисления или подщелачивания, ионного обмена, обратного осмоса [3].

В настоящее время наиболее универсальным методом удаления железа, марганца и аммонийных соединений считается аэрационное биологическое окисление [4]. В какой-то мере этот метод совмещен с химическим окислением, но преобладающим являются микробиологические процессы бактериального удаления этих веществ. После биообработки вода проходит медленные или скорые фильтры[8].

---

[1] Национальный статистический комитет Республики Беларусь. URL: https://www.belstat.gov.by/.

[2] Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. Результаты наблюдений 2021 г. Раздел 3. Мониторинг подземных вод. URL: http://www.nsmos.by/content/menu/print/id/808.

[3] См. сноски 1 и 2.

[4] Кулаков В.В. 100 лет технологии очистки подземных вод от железа в водоносном горизонте (in situ) // Материалы 6-го междунар. конгр. ЭКВАТЭК-2004 «Вода: экология и технология», Москва, 1–4 июня 2004 г. – Ч. 1. – М., 2004. – С. 173–174.

[5] См. сноски 2 и 4.

[6] Постановление Совета Министров РБ от 21 апреля 2016 г. № 326 «Об утверждении Государственной программы «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2016–2020 годы». – URL: http://government.by/upload/docs/file8c3586a947 39667b.PDF.

[7] Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы Республики Беларусь: СН 4.01.01-2019. – Введ. 31.10.19. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 73 с.

[8] Болдырев К.А. Геохимическое моделирование процессов внутрипластовой очистки подземных вод от железа и марганца: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.04. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 2011. – 22 с.

Большинство из этих предлагаемых методов применимо к системам водоснабжения, когда вода от скважин должна быть собрана и обработана на едином централизованном узле в наземном варианте. Но такие решения являются экономически затратными и требуют существенных капитальных и эксплуатационных вложений. Все эти установки нуждаются в периодической промывке фильтров, что требует дополнительного расхода воды на собственные нужды, а также сооружений по сбору и утилизации осадков.

Сейчас водопроводно-канализационным хозяйством Республики Беларусь решаются вопросы подачи надлежащего качества воды к малым населенным пунктам и другим потребителям с оптимизацией затрат на оказание этих услуг, что является *актуальной и значимой* задачей в условиях нынешнего мирового финансового кризиса. Для этого необходимо применять достаточно дешевые, простые, но надежные методы водоподготовки, которые обеспечивают воду с требуемыми нормативными показателями.

С этой точки зрения целесообразно рассмотреть опыт применения метода подготовки воды непосредственно в водоносном пласте скважин *in-situ*, который пока мало изучен в Республике Беларусь [5; 6].

Технология обезжелезивания подземных вод в водоносном пласте. Технология обработки подземных вод в водоносном пласте известна уже более 100 лет[9,10] [1–5].

Широкое практическое применение в качестве альтернативы классическим наземным устройствам эта технология начала получать порядка 40–60 лет тому назад преимущественно на объектах водоснабжения Финляндии, Швеции, Франции, Германии, России и ряда других стран, где работает достаточно много установок внутрипластовой очистки воды производительностью 0,5–90 тыс. м^3/сут[11,12,13].

Метод внутрипластовой очистки подземных вод, прежде всего от железа и марганца (если он присутствует в воде), основан на их совместном химическом и микробиологическом окислении с дальнейшим осаждением непосредственно в водоносном пласте вокруг эксплуатационной скважины за счет создания в нем обширной окислительной зоны. Эффективность метода в водоносном пласте зависит в первую очередь от типа и мощности водоносных пластов, конструкции и технологии бурения скважин, используемых как для закачки обогащенной кислородом воды, так и ее для откачки в распределительную сеть системы водоснабжения при подаче к потребителю.

Вода из водозабора, водопроводной сети, отдельных резервуаров насыщается кислородом воздуха посредством эжектора или компрессора, а затем закачивается в водоносный пласт через скважину, вытесняя подземную воду на величину подаваемого объема воды. Одновременно нужно производить удаление не растворившегося воздуха. При этом из воды происходит выделение различных газов, прежде всего углекислого – CO_2, а также аммиака NH_4^+ и сероводорода H_2S, если последние присутствуют в исходных водах, которые тоже надо удалять из оголовка скважины.

Объем закачиваемой аэрированной воды в подземный пласт $W_{зак}$ определяется химическим составом, мощностью, планируемым объемом ее откачки и многими другими факторами. По окончанию процесса закачки необходимо время для закрепления кислорода воздуха на породе этого пласта.

После осуществления процессов закачки и обогащения водоносного пласта водой, содержащей кислород, производят откачку подземных вод в распределительную систему водоснабжения населенного пункта или объекта в объеме $W_{отк}$ до тех пор, пока концентрация, например, железа и марганца не будет превышать 0,3 и 0,1 мг/дм^3. Окисление и задержание этих загрязнений в подземном водоносном пласте происходит при величине *pH* свыше 7,0–7,5 с увеличением окислительно-восстановительного потенциала водоносного пласта *Eh*, обычно в интервале – 120–400 мВ. В этой зоне закрепленный в водоносном пласте кислород (O_2) вступает в реакцию с растворенным в подземной воде железом в двухвалентной форме (Fe^{2+}), и в результате в породе образуются нерастворимые отложения гидроокиси железа – $Fe_2(OH)_3$, что сопровождается выделением CO_2 и других газов. Например, на окисление 1 мг Fe^{+2} необходимо 0,143 мг O_2, при этом образуется 1,6 мг CO_2 [2]. В процессе окисления железа и марганца в пласте, наряду с химическими реакциями, немаловажная роль принадлежит железо-марганцовокислым бактериям, которые при наличии кислорода синтезируют органические вещества из неорганических для своей жизнедеятельности, получая энергию от окисления этих микроэлементов. Всего 1 мг синтезированного органического вещества таких бактерий (*Liptotrix ochraceae, Galionella ferruginea, Crenotrix polispora* и др.) может окислять до 279 мг Fe^{+2}.

Отмечаются следующие основные преимущества данной технологии *in-situ*:

– позволяет обеспечить одноступенчатую безреагентную очистку подземных вод непосредственно в водоносном пласте до нормативных показателей даже с первоначальным высоким содержанием общего железа (возможно, в несколько десятков мг/дм^3);

---

[9] См. сноски 4, 6, 7 и 8.

[10] Rott U., Meyer C. Residue-free Removal of Arsenic, Iron, Managanese, Ammonia, Nitrate and Colour from Groundwater // Innovations in Conventional and Advanced Water Treatment Processes: Conference Proceedings, Amsterdam, 26–29 Sept. 2000. – P. 8–14.

[11] Коммунар Г.М. Внутрипластовая очистка подземных вод для целей водоснабжения: дис. … д-ра техн. наук: 05.23.04 / Г.М. Коммунар. – М., 1987. – 469 л.

[12] Методические рекомендации по опытно-технологическим исследованиям условий обезжелезивания и деманганации подземных вод в водоносном горизонте / сост. В.В. Кулаков, Б.С. Архипов, С.А. Козлов; науч.-техн. центр «Дальгеоцентр». – Хабаровск, 1999. – 60 с.

[13] Коммунар Г.М. Внутрипластовая очистка подземных вод для целей водоснабжения: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.23.04. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1987. – 39 с.

– учитывая, что продукты реакций осаждения остаются в водоносных слоях, такая технология может считаться безотходной и экологически чистой;

– капитальные и эксплуатационные затраты значительно ниже, чем на сооружениях в наземном исполнении аналогичных по производительности;

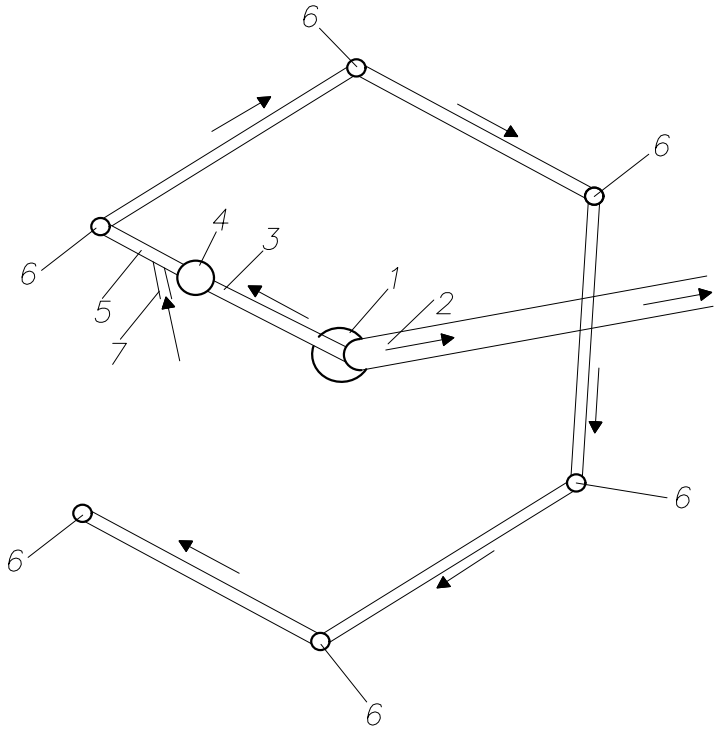
– отсутствие наземных сооружений оборота промывных вод и утилизации осадка;

– положительным сопутствующим эффектом является тот факт, что выпадающие гидроксиды железа и марганца способны сорбировать на своей поверхности токсичные ионы тяжелых металлов и других вредных веществ, что повышает степень защищенности обработанной воды по санитарным показателям.

Эффективность работы внутрипластовой установки принято оценивать отношением объемов откачки и закачки $W_{отк}$ / $W_{зак}$. В зависимости от химического состава вод и гидрогеологических условий это соотношение составляет от 3 до 100, но может быть и выше[14,15].

Основные технологические схемы внутрипластовой обработки подземной воды. В настоящее время широко применяются две системы внутрипластовой обработки подземных вод: *Viredox* и *Subterra*. На основе этих систем установки внутрипластовой обработки выполняются в односкважинных и многоскважинных модификациях.

За рубежом широкое распространение получили многоскважинные установки системы *Viredox* в виде отдельного куста, который состоит из 5–20 скважин для подачи в пласт аэрированной воды на расстоянии по радиусу 5–10 м от одной центральной водозаборной (рисунок 1)[16].



1 – водозаборная скважина; 2 – трубопровод подачи воды в разводящую сеть;
3 и 5 – трубопровод подачи воды в поглотительные скважины; 4 – оксигенератор; 6 – поглощающие скважины;
7 – трубопровод от сборного резервуара с обогащенной кислородом водой

Рисунок 1. – Схема одного куста многоскважинной установки системы *Viredox–1*
для внутрипластовой обработки подземных вод

Они используются в основном при очистке подземных вод неглубоко залегающих горизонтов до 30 м в системах водоснабжения объектов и могут состоять из нескольких кустов, где водозаборные объединены в единую систему, подающую воду как к потребителю, так и в поглощающие скважины[17]. В качестве оксигенератора используются аэрационные устройства, одновременно обеспечивающие глубокое удаление двуокиси углерода CO_2 в водоносном пласте.

Особенностью системы *Viredox–1* является постоянная работа отдельных поглощающих скважин. Также должна быть постоянная работа и центральной скважины. Это же является серьезным недостатком системы, так

[14] См. сноску 11.
[15] См. сноску 8.
[16] См. сноску 13.
[17] См. сноску 8.

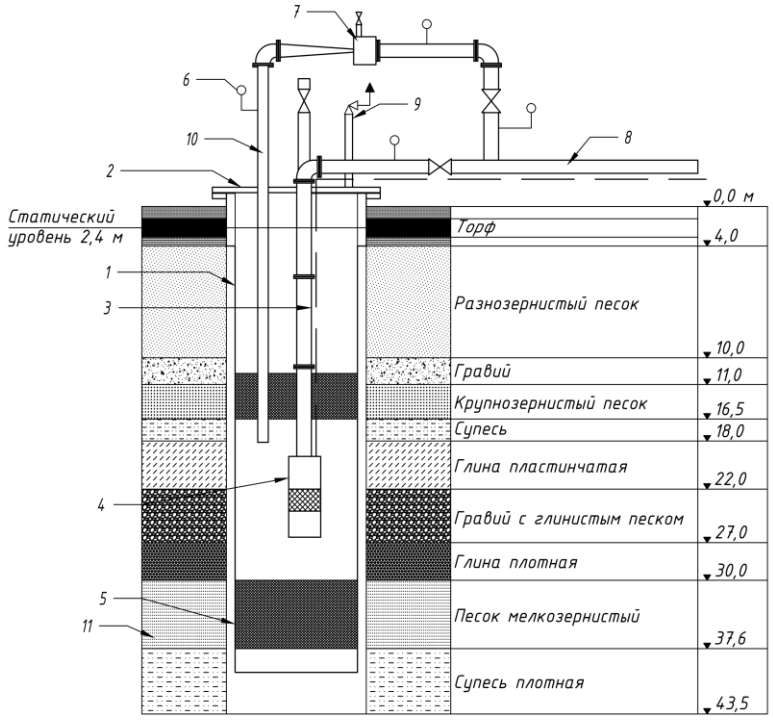
как вода непрерывно подается к поглощающим скважинам. Требуется установка либо дополнительной водоразборной скважины, либо отдельного резервуара для хранения на ее закачку, что приводит к удорожанию всей системы обработки и подачи подземной воды.

В Великобритании, Финляндии, Швеции и ФРГ имеется достаточно большой опыт эксплуатации таких многоскважинных установок. Фирмой *Vyrmetoder AB* (Швеция)[18] [5–7] были разработаны еще 3 типа модификации этого метода. Например, была предложена система *Viredox–2*, которая отличается от других тем, что в каждой из поглощающих скважин дополнительно установлен погружной насос. Причем эжектор для насыщения воды воздухом располагается в наземном напорном трубопроводе поглощающих скважин. Такой насос с одной скважины включается периодически на подачу воды в две соседние (то есть работает в откачивающем режиме), независимо от работы центральной водоразборной. Также необходимо предусматривать отдельный резервуар аварийного хранения объема воды с последующим поступлением в поглощающие скважины при аварийных ситуациях с отключением погружных насосов.

Модификации *Viredox*–3 и –4 отличаются усовершенствованием системы подачи аэрированной воды в водоносный пласт. Аналогично системе *Viredox* может осуществляться внутрипластовое удаление аммонийных соединений, такой способ обработки подземных вод получил название *Nytredox*[19].

Система *Subterra* в настоящее время также применяется во многих странах, но особенно широко в ФРГ и России[20] [7]. В отличие от метода *Viredox*, используемого в ряде европейских стран (Швеция, Финляндия, Германия), при котором обогащенная кислородом вода подается в пласт через специальные нагнетательные скважины, сооружаемые вокруг водозаборных, в данной технологии для этих целей используются непосредственно цикличные водозаборные сооружения.

Сущность состоит в том, что в скважине (рисунок 2) происходят все стадии обработки подземных вод: закачка обогащенной кислородом воды в водоносный пласт, отстой для создания обширной окислительной зоны, первоначальная прокачка на рельеф местности в специально подготовленные места и последующая откачка в систему водоснабжения населенного пункта или объекта. То есть односкважинная система одновременно является закачивающей и нагнетательной, причем эти стадии разделены друг от друга.



1 – скважина; 2 – герметичный оголовок; 3 – водоподъемная колонна; 4 – погружной насос; 5 – фильтр; 6 – манометр; 7 – эжектор; 8 – трубопровод, подающий воду в сеть; 9 – патрубок для удаления газов; 10 – трубопровод, подающий воду на закачку; 11 – водоносный слой

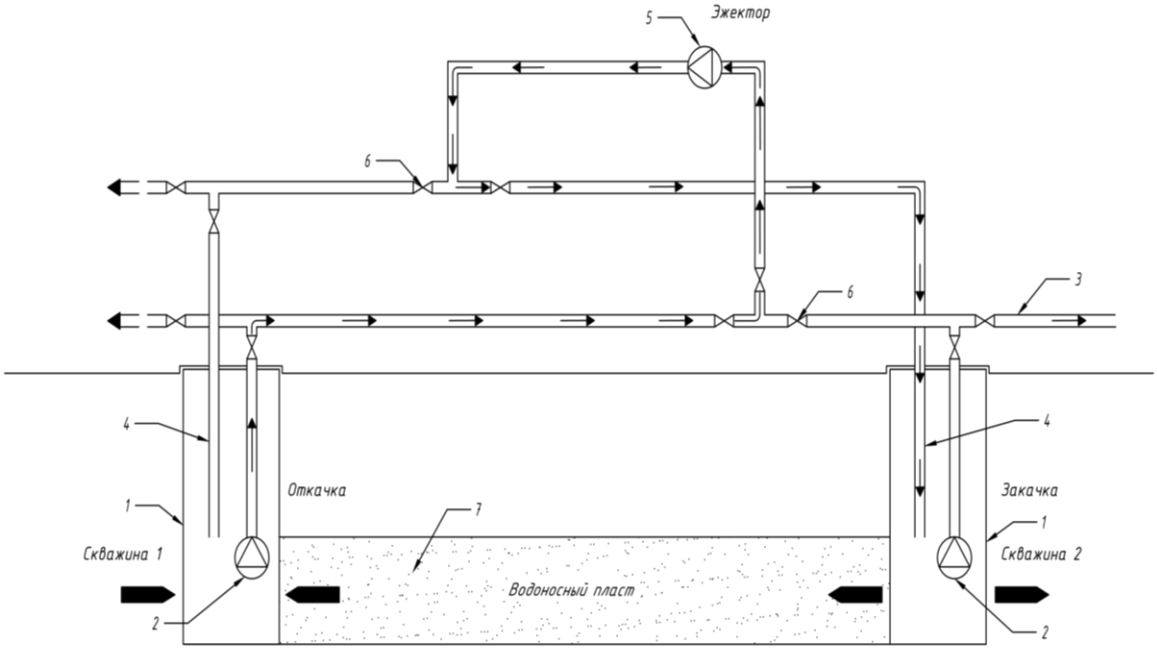
Рисунок 2. – Скважина, оборудованная для внутрипластовой обработки подземной воды [14]

В стадии закачки скважина выключена из работы на систему водоснабжения и вода, обогащенная кислородом воздуха, подается в нее на закачку от соседних скважин. Если число скважин равняется двум, то они ра-

[18] См. сноски 10 и 13.
[19] См. сноску 10.
[20] См. сноску 13.

ботают попеременно (рисунок 3): одна на закачку, вторая на откачку воды. Для обогащения воды кислородом воздуха, как вариант, также можно применить отдельный резервуар, но тогда нужно устраивать дополнительно насосы для ее закачки в подземный пласт. Возможно использование постороннего водопитателя для закачки, например, какого-то поверхностного источника [6].

Для одной скважины обязательно предусматривают отдельный резервуар хранения объема воды на ее закачку, или эта часть должна быть в составе резервуара чистой воды. Так, в ФРГ эксплуатируется более 7 тыс. таких установок, разработанных фирмой *Fermanox* для водопотребления отдельных комплексов зданий и объектов.



1 – скважина; 2 – погружной насос; 3 – трубопровод подачи воды к потребителю;
4 – трубопровод подачи воды в подземный пласт; 5 – эжектор; 6 – запорные устройства; 7 – водоносный пласт

Рисунок 3 – Технологическая схема внутрипластовой обработки воды двух скважин[21]

Опыт использования внутрипластовой обработки подземных вод в Республике Беларусь. В СССР внутрипластовая обработка воды получила распространение в начале 80-х годов прошлого столетия благодаря активным исследованиям и работам сотрудников НИИ ВОДГЕО[22] [5; 6]. Данная технология получила достаточно широкое применение на водозаборах Дальнего Востока и Приамурья, например, в районах г. Комсомольск-на-Амуре и г. Хабаровска[23] [5–8].

В Республике Беларусь также в это время начали довольно широко использовать установки обезжелезивания (циклического типа) для обработки подземных вод. Однако незнание гидрогеологических особенностей водоносных слоев и конкретного исходного состава подземных вод, а также часто отрицательное ведение процессов обработки воды привело к многочисленным неудовлетворительным результатам по качеству подаваемой воды потребителю. Также в некоторых случаях из-за неправильного проведения стадии закачки обогащенной воды кислородом воздуха в подземный пласт происходила кольматация водоносного слоя в прискважинном пространстве или образование неравномерной зоны окисления в скважинах. Все это привело к фактическому отказу данного метода.

Однако есть и такой положительный пример, как водозабор «Малыничи» в г. Чечерск Гомельской области, который работает по данному методу более 20 лет.

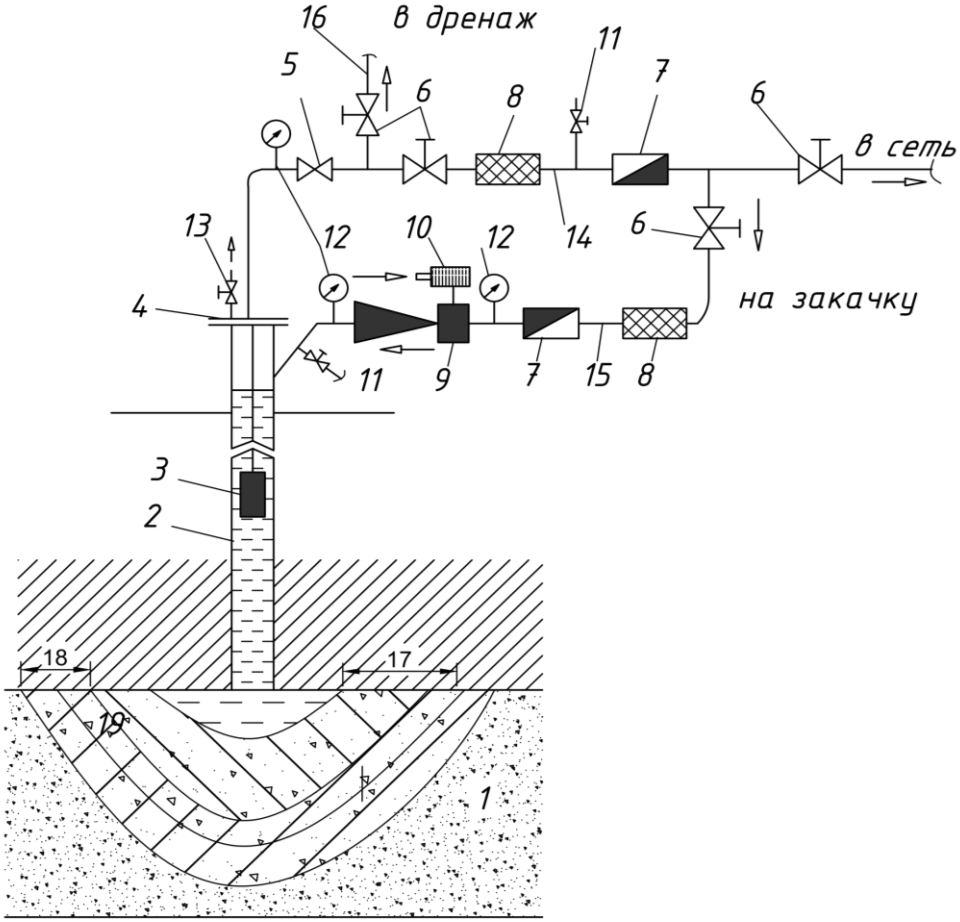
Метод внутрипластовой обработки подземных вод водозабора «Малыничи» по системе *Subterra* был применен на трех существующих скважинах глубиной 121,5–123,5 м, для которых произведен монтаж необходимого оборудования, выполнена первичная закачка воды в подземный пласт, и в 2004 г. они приняты в эксплуатацию. В дальнейшем были пробурены еще две, глубиной 111 м, и в 2007 г. водозабор «Малыничи», состоящий из пяти эксплуатационных скважин, вышел на фактическую производительность города 1300 (зимой) и 2000 (летом) при проектной величине в 2500 м^3/сут. Материалы представлены КЖУП «Чечерское».

Производительность каждой скважины, оборудованной частотными устройствами, составляет 25–30 м^3/ч при дебете в 50 м^3/ч. В работе постоянно находятся до 2–3 скважин, остальные две являются резервными или в процессе закачки воды в подземный пласт.

[21] См. сноску 8.
[22] См. сноску 8.
[23] См. сноски 10 и 13.

Все скважины несовершенного типа расположены в один ряд с расстоянием между ними до 300 м, имеют одинаковый основной водоносный слой, состоящий из глауконито-кварцевого средне-мелкозернистого песка мощностью 6,5–17 м, который характеризуется пористостью 30–35%, размером зерен 0,1–0,5 мм и коэффициентом фильтрации 1–20 м/сут.

Выше этого слоя расположен мел плотный, слабо трещиноватый, мягкий, рассыпчатый, тонкопористый с размером зерен менее 0,01 мм. Основу химического состава мела составляет карбонат кальция $CaCO_3$ с небольшим количеством карбоната магния $MgCO_3$, но обычно присутствует и некарбонатная часть, в основном оксиды различных металлов. Формы залегания – слои и мощные слоистые толщи. В водной среде практически не растворим, имеет непостоянную водообильность и вследствие этого ограниченное значение для систем водоснабжения населенных пунктов. Однако наличие трещиноватости, заполненной меловой мукой, свидетельствует о поступлении, хотя и малого количества, воды в скважины водозабора «Малыничи» наряду с основным песчаным водоносным слоем. Скважины являются безфильтровыми и пробурены только до основного водоносного песчаного слоя. Поэтому в качестве приемной части каждой скважины в песке были размыты каверны глубиной 1,5–2,0 м. Технологическая схема работы скважин водозабора «Малыничи» представлен на рисунке 4.



1 – водоносный пласт из средне-мелкозернистого песка; 2 – скважина; 3 – погружной насос; 5 – обратный клапан; 6 – задвижки; 7 – водомер; 8 – осадочный фильтр; 9 – эжектор; 10 – воздушный фильтр; 11 – спускной вентиль; 12 – манометры; 13 – регулировочный вентиль; 14 – линия откачки; 15 – линия закачки; 16 – линия дренажа; 17 – зона адсорбции кислорода на зернах подземного пласта; 18 – зона вытеснения пластовой воды, нагнетаемой с другой скважины; 19 – зона реакции и осаждения железа

Рисунок 4. – Технологическая схема скважины водозабора «Малыничи» для внутрипластовой обработки подземных вод

Процесс обезжелезивания каждой скважины представляет собой перечень мероприятий:

– закрывается задвижка на подающей трубе в общий трубопровод скважин, то есть полностью выключается из работы на систему водоснабжения;

– открывается задвижка на трубопроводе с эжектором и воздушным фильтром, соединяющим сборный водовод и обсадную колонну скважины;

– через эжектор (рисунок 5) под давлением не менее 0,15 МПа (желательно 0,2 МПа) вода в требуемом объеме из общего сборного водовода закачивается в обсадную колонну скважины;

– вода в скважину закачивается в течение 48 часов (объем закачки, м^3, определяется конкретно для каждой скважины и составляет 600–1000 м^3);

– после закачки закрывается задвижка от сборного водовода, и скважина отстаивается 2–3 суток;

– затем открывается задвижка на трубопроводе сброса воды в пруд-отстойник (100 м от скважин), и из скважины выкачивается ее объем $W_{сбр}$, ориентировочно 650 м^3, до полного осветления и получения нормативного значения по концентрации железа в 0,3 мг/дм^3;

– открывается задвижка на подающей трубе в общий трубопровод, и скважина опять начинает работать в системе водозабора на откачку воды к потребителям.

Рисунок 5. – Эжектор скважины

Зависимость концентрации железа от соотношения $W_{отк}/(W_{зак} + W_{сбр})$ в скважинах водозабора «Малыничи» (по данным КЖУП «Чечерское», ГО ЖКХ Гомельская область) приведена в таблице 1.

Таблица 1. – Зависимость концентрации железа от соотношения $W_{отк}/(W_{зак} + W_{сбр})$ в скважинах водозабора «Малыничи»

№ скважины	Концентрация железа (мг/дм^3) при соотношении $W_{отк}/(W_{зак} + W_{сбр})$, м^3/м^3					
	20	40	60	80	100	120
1	0,1	0,15	0,15	0,3	-	-
2	0,1	0,1	0,15	0,15	0,20	0,35
3	0,15	0,15	0,3	0,5	-	-
4	0,1	0,1	0,15	0,15	0,3	-
5	0,1	0,1	0,15	0,35	-	-

Согласно опыту эксплуатации водозабора «Малыничи» было установлено следующее:

– если производить объем откачки более, чем дебет скважины, может происходить пескование водоносного слоя с помутнением воды. Поэтому был уменьшен расход из скважин до 25–30 м^3/ч с соблюдением всех правил и порядка пуска и остановки погружного насоса;

– замечено, что после первоначальной закачки воды в скважину с каждыми последующими циклами показатели обработки подземных вод незначительно улучшаются, а продолжительность откачки – наоборот увеличивается на 3–5% в связи с ростом каталитической пленки на частицах водоносного пласта и дополнительным осаждением кислорода на нерастворимых веществах загрязнителей;

– давление в городской сети должно обеспечиваться частотным преобразователем скважины, желательно также гидростатическим давлением резервуара чистой воды. При пуске и остановке погружного насоса необходимо обеспечивать мероприятия, препятствующие возникновению гидроудара, в результате чего в призабойной зоне скважины может резко увеличиться скорость фильтрации, нарушающая устойчивость откосов каверны и водоподъемных колонн скважины. Пуск насосов после простоя скважины нужно производить на приоткрытую задвижку с последующим постепенным ее открытием;

– вода, закачиваемая в скважину, а также идущая на сброс, проверяющими инстанциями считается потерями воды, что увеличивает показатель потерь воды по предприятию;

– при возникновении явлений кольматажа водоносного слоя около скважины или отложений внутри водоподъемных колонн возможна механическая прочистка или использование химических реагентов.

Заключение. Опыт применения внутрипластовой обработки подземных вод за рубежом и в Республике Беларусь свидетельствует о возможности более широкого ее использования в системах централизованного водоснабжения населенных мест. Этот метод (*in-situ*) в реализации и эксплуатации может быть проще и дешевле, чем более распространенное удаление загрязнений непосредственно на станциях и установках водоподготовки наземного расположения (*ex-situ*).

Учитывая актуальность подачи воды питьевого качества для малых населенных пунктов с небольшими значениями суточного водопотребления, желательно рассмотреть применение данного метода для водоносных слоев из песков различной крупности, известняков и доломитов, как наиболее часто встречающихся на территории Республики Беларусь, в частности Витебской области.

Эффективность данного метода оценивается исходя из минералого-литографического состава водоносных слоев, строения этих горизонтов, а также химического состава подземных вод и производительности системы водоснабжения.

Основной задачей технологических исследований и расчетов систем внутрипластовой обработки является определение оптимальных соотношений между объемами закачиваемой и откачиваемой воды (желательно не менее 3–5), при которых обеспечивается непрерывная подача заданного количества очищенной воды потребителю. Также необходимо установить влияние этого метода на возможное изменение гидравлических характеристик водоносного пласта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуринович А.Д. Современное состояние и стратегические задачи водного хозяйства Беларуси // Чистая вода: проблемы и решения. – 2012. – № 1. – С. 111–112.
2. Николадзе Г.И., Сомов М.А. Водоснабжение. – М.: Стройиздат, 1995. – 688 с.
3. Основные пути и решения проектирования систем водоподготовки малых населенных пунктов в Республике Беларусь / В.Д. Ющенко, Е.С. Велюго, Е.И. Рашкевич и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Стр-во. Приклад. науки. – 2021. – № 16. – С. 124–130.
4. Седлухо Ю.П. Очистка сложных многокомпонентных вод биохимическими методами // Вода Magazine. – 2014. – № 6. – С. 82.
5. Кулаков В.В. Использование внутрипластовой очистки подземных вод от железа и марганца (на примере водоснабжения г. Хабаровск) // Вестн. ДВО РАН. – 2013. – № 2. – С. 84–89.
6. Гуринович А.Д., Вавренюк П., Ельский И. Возможности удаления из воды железа в водоносном пласте на примере существующих водозаборных скважин // Вода и экология: проблемы и решения. – 2013. – Т. 2, № 54. – С. 12–20.
7. Braester C., Martinell R. The Vyredox and Nytredox method in-situ Treatment of Groundwater // Wat. Sci & Tech. – 1988. – № 20(3). – P. 149–163.
8. Плотников Н.А., Алексеев В.С. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. – М.: Стройиздат, 1990. – 256 с.

REFERENCES

1. Gurinovich, A.D. (2012). Sovremennoe sostoyanie i strategicheskie zadachi vodnogo khozyaistva Belarusi [Current state and strategic objectives of the water industry in Belarus]. *Chistaya voda: problemy i resheniya* [*Clean Water: Problems and Solutions*], *(1)*, 111–112. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Nikoladze, G.I. & Somov, M.A. (1995). *Vodosnabzhenie*. Moscow: Strojidat. (In Russ).
3. Yushchenko, V.D., Velyugo, E.S., Rashkevich, E.I., Prosolov, V.P. & Sedlukha, S.V. (2021). Osnovnye puti i resheniya proektirovaniya sistem vodopodgotovki malykh naselennykh punktov v Respublike Belarus' [The main ways and solutions for designing water treatment systems for small settlements in the Republic of Belarus]. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Bulletin of the Polotsk State University. Series F, Construction. Applied Science], (16)*, 124–130. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Sedlukho, Yu.P. (2014). Ochistka slozhnykh mnogokomponentnykh vod biokhimicheskimi metodami [Purification of complex multicomponent waters by biochemical methods]. *Voda Magazine [Water Magazine], (6)*, 82. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Kulakov, V.V. (2013). Ispol'zovanie vnutriplastovoi ochistki podzemnykh vod ot zheleza i margantsa (na primere vodosnabzheniya g. Khabarovsk) [The use of in-situ purification of groundwater from iron and manganese (on the example of water supply in Khabarovsk)]. *Vestnik DVO RAN [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences], (2)*, 84–89. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Gurinovich, A.D., Vavrzhenyuk, P. & El'skii, I. (2013). Vozmozhnosti udaleniya iz vody zheleza v vodonosnom plaste na primere sushchestvuyushchikh vodozabornykh skvazhin [Possibilities of removing iron from water in an aquifer on the example of existing water wells]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya [Water and ecology: problems and solutions], 2(54)*, 12–20. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Braester, C. & Martinell, R. (1988). The Vyredox and Nytredox method in-situ Treatment of Groundwater. *Wat. Sci & Tech., 20(3)*, 149–163. DOI: 10.2166/wst.1988.0093.
8. Plotnikov, N.A. & Alekseev, V.S. (1990). *Proektirovanie i ekspluatatsiya vodozaborov podzemnykh vod*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).

Поступила 29.05.2023

EXPERIENCE OF USING THE METHOD OF INJECTION OF WATER INTO THE UNDERGROUND LEVEL WITH ITS SUBSEQUENT PUMPING INTO THE WATER SUPPLY SYSTEM OF SETTLEMENTS IN THE REPUBLIC OF BELARUS

H. RASHKEVICH[1], V. YUSHCHENKO[2], I. SALIVONCHIK[3]
([1], [2]Vitebsk Regional Municipal Unitary Enterprise of water supply and sewage "Vitebskoblvodokanal",
[3]Ministry of Housing and Communal Services of the Republic of Belarus, Minsk)

The article describes the technology and basic features for pumping water into underground reservoirs with subsequent pumping into water supply systems, the experience of using this method abroad and in the Republic of Belarus.

Keywords: *wells and aquifer, water quality, technology and features for pumping water into an underground reservoir, the experience of the method abroad and in the Republic of Belarus.*

УДК 347.787+904(476) **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-63-73**

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСА БЫВШЕГО «ГРАНД ОТЕЛЯ»

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

В статье представлены итоги натурного изучения одного из корпусов комплекса зданий бывшей гостиницы «Гранд Отель», проводившегося в ходе строительных работ. Данный объект расположен в центре исторической части Полоцка по адресу проспект Ф. Скорины, д. 3 и д. 5. Нами предполагалось наличие в его составе более ранних монументальных сооружений XVII – XVIII вв. и связанных с ними движимых артефактов. В ходе изучения существующего здания выявлена коробка внешних стен постройки конца XVIII в., а также собраны связанные с её историей артефакты. Зафиксирован ряд элементов первоначальных планировок и архитектурного убранства, следы позднейших перестроек здания и найденные движимые артефакты, связанные с располагавшимися здесь учреждениями.

Ключевые слова: *«Гранд Отель», натурные исследования, городская архитектура, шурфы, реконструкция.*

Введение. Изучаемое здание располагается на ул. Советская в г. Полоцке и является частью комплекса с почтовым адресом по проспекту Ф. Скорины, дома №№ 3–5. Объект является историко-культурной ценностью 3-й категории. Длительное время здесь находились торговые, учебные и жилые 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. здание, расположенное на углу проспекта Ф. Скорины (д. 5) и ул. Ленина, было приобретено частной компанией ООО «Форт кей» с целью устройства в нём гостиничного комплекса под старым названием «Гранд Отель». В том же 2019 г. компанией были приобретены остальные постройки, примыкающие к зданию: дома №№ 3–5 по проспекту Ф. Скорины, в состав которых входит изучаемое нами здание. Таким образом, нами были продолжены исследования старейшего гостиничного комплекса г. Полоцка, что позволило собрать ценную информацию по истории архитектуры и строительства данного объекта.

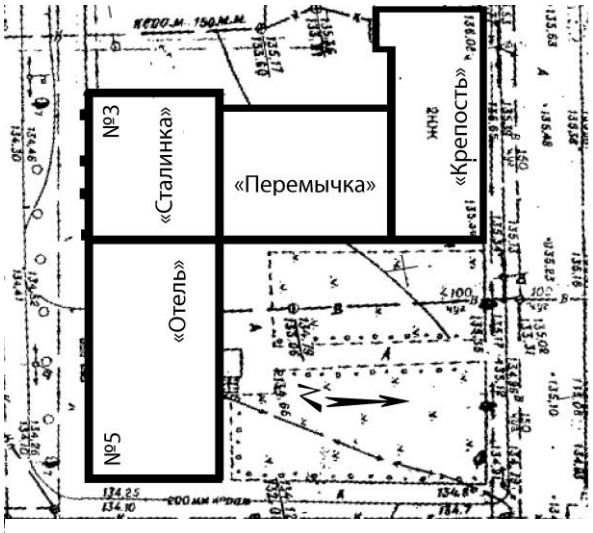


Рисунок 1. – План комплекса зданий бывшего «Гранд Отеля»

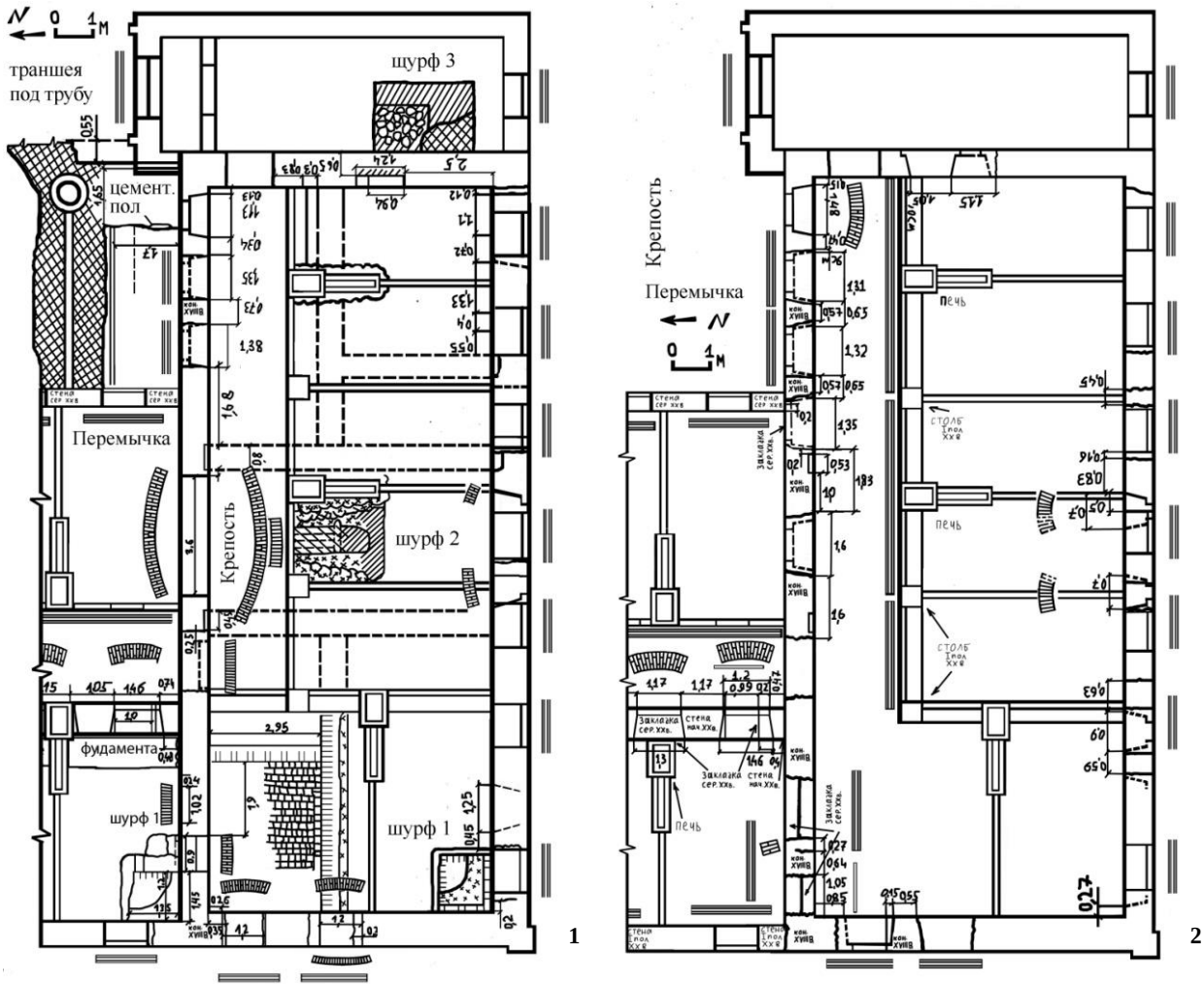
Фактически здание бывшего «Гранд Отеля» по проспекту Ф. Скорины (дом № 3) представляет собой комплекс из четырёх разнохарактерных в архитектурном, конструктивном и стилевом отношении строений, последовательно связанных между собой и напоминающих в плане форму буквы «Z». Всем частям комплекса были даны условные наименования: восточное крыло – «Отель», западное крыло – «Сталинка», дворовая часть здания – «Перемычка» и северное, обращённое главным фасадом на параллельную проспекту улицу, – «Крепость» (рисунок 1).

Здание «Гранд Отеля», условно названное нами «Крепостью», к началу ремонтно-восстановительных работ полностью утратило первоначальную архитектуру фасадов и планировку. Имеющиеся форма окон, междуэтажный карниз и конструкции кровли позволяли отнести его к середине XX в., но значительная толщина стен и низкий уровень подоконников первого этажа относительно уровня тротуара (около 0,4–0,5 м) указывали на более древнюю постройку в основе здания. Маленькие окна, толстые неровно оштукатуренные стены и приземистый облик строения обусловили его название – «Крепость».

Основная часть. Для изучения «Крепости» были проведены натурные исследования её стен и подполья. Привязка находимых объектов по уровню высот осуществлялась к чистовому полу, имевшемуся до начала строительно-реставрационных работ, уровень которого и сегодня остался практически прежним.

Имеющиеся изобразительные источники свидетельствуют, что на планах Полоцка конца XVIII в. на месте расположения «Крепости» находилось крупное кирпичное здание, первоначальное назначение которого неизвестно. Его очертания на планах Полоцка 1786 и 1793 гг. – вытянутый с востока на запад прямоугольник с пристройками на южной стороне. На планах города начала XIX в. видно, что изучаемое здание входило в состав огромного сооружения с внутренним двором, обозначенного как «Почтовый двор» [10, с. 380, рисунок 4.4.4; с. 381, рисунок 4.4.6; с. 382, рисунки 4.4.7 и 4.4.8]. Открытки с панорамами восточной части Полоцка конца XIX – начала XX вв., где «Крепость» частично просматривается, демонстрируют низкую двухскатную кровлю здания и белёные(?) стены [4, с. 143]. Большой интерес представляют фотографии здания «Крепости»,

сделанные в годы Великой Отечественной войны. На аэрофотосъёмке Полоцка 1944 г. исследуемые объекты хорошо просматриваются. Они представляли собой поврежденные огнём кирпичные коробки с хорошо читаемой внутренней планировкой большинства несущих стен. Ещё одна фотография, сделанная с самолёта после освобождения Полоцка в 1944 г., зафиксировала северный (главный) фасад изучаемого нами здания, расположенного на дальнем плане. Видно, что оно было побелено, а форма и характер расположения частично повторяют расположение существующих проёмов. В центральной части северного фасада виден балкон, в западной стене, на уровне фронтона и второго этажа, по центральной оси просматриваются оконные проёмы.

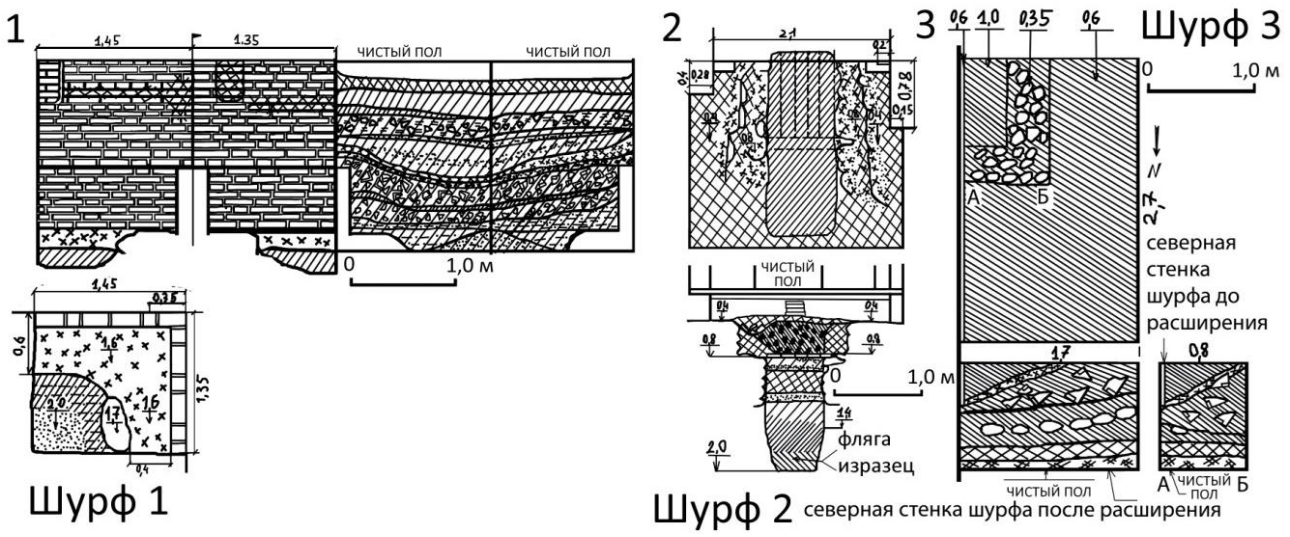


1 – первый этаж с шурфами и частичными обмерами; 2 – второй этаж с частичными обмерами; пунктиром отмечены обнаруженные стены

Рисунок 2. – Планы этажей «Крепости»

На момент начала строительных работ предварительный визуальный осмотр показал, что здание имеет толстые внешние несущие стены с нишами основного объёма и тонкие стены пристроенного с западной стороны подъезда с лестницей на второй этаж. По убранству и конструктивным элементам она повторяла лестницу в «Сталинке». Анализ фотографий первой половины XX в. дает возможность утверждать, что данный подъезд пристроили уже после 1945 г. Основу внутренней конструкции составляли кирпичные столбы, перегородки и перекрытия были деревянными, имевшееся печное отопление, судя по мусору в дымоходах, вышло из строя ещё во второй половине 60-х годов XX в.

Изучение подполья и прилегающей к «Крепости» территории. Для изучения конструкций и состояния фундаментов «Крепости» строителями были вырыты два шурфа (рисунок 3). Привязка по глубине конструкций слоёв и артефактов осуществлялась к чистовому полу, бывшему на начало работ до ремонта, который, относительно пола примыкающих к нему зданий, был ниже на одну ступеньку. Современный пол первого этажа «Сталинки», «Перемычки» и «Крепости» теперь расположен на одном уровне и соответствует уровню пола «Крепости» до начала ремонта.



1 – шурф 1 в северо-восточном углу «Крепости»; 2 – шурф 2 между двух столбов на месте проезда; 3 – шурф 3 в пристройке под лестницей

Рисунок 3. – План шурфов «Крепости»

В северо-восточном углу «Крепости» был заложен **шурф 1** (см. рисунки 2:1, 3:1) размером 1,35 × 1,45 м для изучения подпольной части стен. Расчистка кладки стен ниже уровня пола показала, что она характерна для зданий XVIII в. – массивный крупноформатный кирпич 29,0 × 5,7 – 6,0 × 13,5…1,4 см, раствор с примесями комьев непромешанной белой извести, в кладке преобладает система ложок-тычок в крестовой перевязке. На глубине 1,0 м от современного чистого пола стена имела уступ в половину кирпича. В северной стене прослежен шов кладки замурованного проёма, дно которого располагалось на глубине 0,4 м от современного чистого пола. На стене на глубине 0,4–0,5 м от чистого пола прослежена чёрная полоса – след от слоя угля, оставшегося после одного из пожаров, которые здание многократно переживало за свою историю. На глубине 1,1 м от чистого пола кладка имела выступ в 1/3 кирпича. Система кладки выше уровня данного выступа представляла собой чередование в одном ряду тычка и одного-двух ложков кирпичей со смещением на 1/3 или 1/4 длины кирпича в нижнем ряду. На глубине 1,6 м от пола прослежена поверхность каменной кладки. За плоскость стен она выступала на 0,4–0,5 м и представляла собой мощную подушку, толщина которой прослежена до 0,3 м. Система кладки ниже выступа и до каменной подушки представлена чередованием ложков и тычков кирпича в каждом ряду, уложенных со смещением относительно нижнего ряда.

Засыпка под чистым полом начиналась с глубины 0,35 м. В верхних слоях (балласте) найден обломок тарелки с клеймом лев в треугольнике с надписью «MADE…SOVIET». Под балластом следовал слой серой земли толщиной 0,2–0,3 м, у восточной стены здания под ним была обнаружена клиновидная прослойка тёмно-серой земли длиной 1,0 м и до 5,0 см толщиной. Ниже находился слой серой земли с примесью печной красной глины и кирпичного боя толщиной 0,2–0,3 м, под которым к северной стене примыкала прослойка 1,3 м длиной и до 5,0 см толщиной. На глубине 0,9 м прослежен слой земли с песком, его толщина в середине – до 0,2 м, по краям около 5 см, он заполнял впадину, образованную лежащими ниже слоями.

На уровне уступа на глубине 0,9–1,1 м от чистого пола прослежена прослойка белой извести, под и над которой имелись вкрапления угля, представлявшие собой слой толщиной до 5,0 см, примыкавший к стенам здания. Под ней, в западной стенке шурфа, прослежена прослойка серой земли толщиной до 6 см, в северной стене здания она сужается. Далее, с глубины 1,1–1,35 м имелся влажный слой серой земли с красной глиной, обломками кирпича XVIII в., изразцов и черепицы XVIII–XIX вв. [7, с. 82; 8, с. 162–163; 9, с. 79–80], ниже (1,5–1,7 м) начинался слой извести, песка и кирпичного боя XVIII в., переходящий в слой суглинка толщиной от 7,0 до 20 см с примесью земли, под которым располагался слой серой земли толщиной 20,0 см, перекрывающий выступавший со дна шурфа суглинок (материк(?).

Шурф 2 был заложен между двумя столбами перед входом в одну из комнат «Крепости»: 2,5 × 2,5 м на уровне пола и 0,7 × 2,0 м у дна (см. рисунки 2:1, 3:2). Конструкции их оснований начинались на глубине 0,4 м и были сложены из бута – круглых булыжников разных размеров. На кладке прослежены обмазанные известковым раствором выступы шириной около 0,4–0,5 м. В западном выступе имелось гнездо от круглого бревна диаметром 16,0–17,0 см, на котором ранее лежали доски пола(?) шириной 15,0–17,0 см и 2,0–3,0 см толщиной. Данная конструкция располагалась на глубине 0,8 м, там же на растворе с западной стороны имелся отпечаток доски пола. Вся конструкция обгорела во время пожара. Восточная сторона каменной кладки признаков подобных конструкций не имела.

Засыпка подполья начинается с глубины 0,3 м, под ней имелся слой мусора до 12,0 см толщиной. Ниже до обугленного пола прослежен слой угля и золы от пожара, перекрывающий доски пола. В нём найдены обломки изразцов и фарфора первой половины XX в. со следами пожара. Ниже, под полом, прослежены остатки прослойки жёлтой извести, далее – слой серой земли толщиной около 10,0 см, под которым размещалась прослойка песка. Ниже прослежена серая земля с обломками кирпича. Шурф был доведён до глубины 1,4 м, его размеры у дна 0,7 × 2,0 м. После глубины 1,5 м начинался сырой слой чёрной земли, в котором был найден фрагмент изразца с изображением гусара и жбана, орнаментированного «карбовкой» XVII в.

После исследования строительных шурфов проводилась выборка земли во всём здании на глубину 0,8 м для подготовки основы и понижения уровня новых полов относительно изначального. Заполнение под полами центральной части коридора «Крепости» представлено мощным завалом мусора с артефактами последней четверти XX в., прослеженными до глубины 0,5 м от чистого пола, изредка встречались артефакты первой половины XX в. В ходе выборки земли также были обнаружены остатки двух капитальных поперечных кирпичных стен. Расстояние между ними – около 3,6 м, их кладка была перевязана с основными стенами здания. Ширина найденных стен колебалась в диапазоне от 0,76 до 0,8 м (2,5–3,0 кирпича). Между ними был вырыт шурф между двумя столбами (шурф 2) и сосредоточен завал с артефактами последней четверти XX в., расположенный под деревянными полами. Дальнейшие исследования показали, что артефакты первой половины XX в. были сосредоточены в юго-западной и юго-восточной частях здания. Один из завалов с артефактами первой половины XX в. был в восточной части коридора между столбом и южной стеной с прорубленным проёмом в коридор «Перемычки». На этом участке с глубины 0,5 м собраны обломки чёрного и белого мрамора, оплавленные стеклянные пузырьки и бутылки, он также представлен медной сковородой, редкими обломками керамики, фаянсовой и фарфоровой посуды и изразцов. Среди находок есть остатки набора кукольной детской посуды. Данный слой толщиной 10,0–20,0 см, насыщенный углём и известью, находился на глубине 0,6 м от пола второй половины XX в.

Дальнейшая выборка земли и разработка в здании траншей для труб канализации выявила остатки двух стен, отделявших юго-восточный угол здания. Толщина их не превышала 0,6 м (два кирпича). Вторая стена, поперечная, отделяла небольшую комнату в юго-восточном углу здания. Следов перевязки стен с первоначальными кладками здания не обнаружено. Перевязка поперечной стены была обнаружена в закладке проёма восточной стены. Там рабочим пришлось прорубать завал и массив кладки. Кирпич конструкций 28,0 × 13,0 × 5,0 см. Возможно, внутренние стены были встроены вскоре после возведения здания. Размеры найденной комнаты 2,9 × 3,2 м, а в северной стене помещения имелись следы проёма двери – сохранилась выкладка из кирпича со следами сильного истирания поверхности ногами. С глубины 0,7–0,95 м от чистого пола второй половины XX в. прослежен просевший первоначальный пол комнаты, выложенный половинками и целыми кирпичами. Большинство их рядов было ориентировано с севера на юг.

Заполнение над полом в контуре данных стен было следующим. Под сбитой плиткой и стяжкой начала XXI в. до 0,2 м толщиной начинался слой строительного мусора толщиной 0,2 м, там встречались кладки столбиков деревянного пола. Далее начинался слой строительного мусора коричневого цвета толщиной 10–15 см. Он перекрывал остатки стяжки – цемента, залитого по кирпичному бою. Под ним вновь следовал слой строительного мусора толщиной до 10,0 см, где был найден оплавленный обломок бутылки с орлом производства Калинкина в Санкт-Петербурге [3, с. 479]. Слой угля толщиной местами от 5,0 до 20,0 см с фарфором, фаянсом и повреждённым пожаром стеклом, относящимися к концу XIX – началу XX вв., располагался следующим слоем. В обоих слоях были найдены обломки фигурного кафеля, относящегося к фигурному навершию печи, но никаких следов расположения печи обнаружить не удалось. Слой угля от кирпичного пола отделяла прослойка извести толщиной до 5,0 см. В западной части здания также были найдены остатки продольной стены, кладка которой имела толщину в 2 кирпича (около 0,62 см). Перевязки с западной стеной здания она не имела. Ширина образованного ими помещения составляла 2,8–2,9 м, длина – около 6,7 м. Фактически это был небольшой коридор. Южнее данной стены в юго-западном углу здания на глубине 0,5 м начинался слой пожара с обломками и целыми образцами стеклянной, фаянсовой и керамической посуды 20-х – 40-х гг. XX в. с клеймами советских заводов. Слой содержал угли, известь и перекрывал кирпичную вымостку, расположенную на глубине 0,8 м.

Шурф 3 (см. рисунки 2:1, 3:3), который предполагался для введения в теплопункт здания труб, был вырыт рабочими в пристройке под лестницей и использовался для изучения нижней части фасада западной стены. После снятия бетона (чистый пол) толщиной 10–15 см под ним был найден слой мусора. Врезка показала, что он перекрывает остатки каменной мостовой, камни которой частично перемешаны. Под остатками мостовой начиналась серая сырая земля (глубина 0,1–0,2 м от чистого пола), насыщенная обломками черепицы и связующего её раствора с отпечатками пластин [6, с. 59; 7, с. 82]. Среди обломков найдены фрагменты фарфоровой посуды с позолотой и оконного стекла. Они остались после реконструкции здания в начале XX в. Дальнейшие исследования позволили расширить шурф до 1,7 × 2,7 м и углубить до 0,8 м от уровня чистого пола. Выяснилось, что верхний слой земли глубиной 0,2 до 0,4 м от чистого пола насыщен камнями мостовой. Там найдены обломки железок, завесы ворот(?), подкова. Ниже была найдена прослойка черепицы, имеющая перепады верхней границы от 0,2 м у стены до 0,4 м от чистого пола на расстоянии 1,0 м от неё. У стены толщина прослойки составляла около 0,1 м и на расстоянии около 1,0 м от стены – более 0,2 м. В слое черепицы найдены образцы фарфора и стеклянная подвеска от люстры, керамика второй половины XIX – начала XX в. Нижняя граница

прослойки располагалась на уровне 0,3–0,6 м от земли. Ниже слоя черепицы в северо-западной части шурфа имелась прослойка извести толщиной до 3,0–5,0 см, имевшая уклон в западном направлении от 0,6 до 1,0 м, далее начинался слой тёмно-серой земли.

Обследование фасадной стены здания выявило на глубине 0,6 м от чистого пола выступ шириной 5,0 см.

В связи с прокладкой двух ветвей канализации, от «Крепости» и «Перемычки» к зданиям бывшего общежития вели траншеи. Они сходились к колодцу, от которого выводились трубы в ближайшую канализационную линию. Ширина траншей варьировалась от 1,0 до 3,0 м в районе расположения колодца. Глубина траншей составляла от 1,0 м на уровне труб до 1,5 м на уровне дна колодца (см. рисунок 2:1). Культурный слой обеих траншей представлял собой сплошной перекоп с артефактами начала – середины XX в. В траншее, ведущей от «Крепости», на глубине около 0,8 м были прослежены фрагменты бетонного пола и плохо сохранившаяся кладка стены толщиной в 1,5 кирпича. Над полом в слое угля и золы найдены обломки стекла и керамики со следами пожара первой половины XX в.

Во время зачистки кладки выступа входа в подъезд (пристроен в 50-х годах XX в.) был зачищен провал, заполненный кирпичом. Выборка показала, что пристроенная стена нависает над более старой кладкой на 0,22 м. Данная кладка относилась к северному крылу здания, предварительно датированного нами концом XVIII – началом XIX вв. При разработке ямы под колодец был выявлен срез данной кладки: толщина около 0,65 м, формат кирпича 28,0 × 14,5 × 6,5 см, толщина швов от 1,5 до 3,0 см. Длина прослеженного участка (от основной коробки здания) составила около 2,1 м, в нижней части стены, с восточной стороны, прослежен кирпичный выступ шириной около 9,0 см, общая высота расчищенной кладки – 0,4 м, начинается она на глубине около 0,3 м от тротуарной плитки.

Траншея от примыкавшей к «Крепости» перемычки имела перемешанный культурный слой. При обсыпке уложенной трубы рабочими была обнаружена ещё одна стена. Она начиналась на глубине 0,4 м от дневной поверхности (газон), кладка стены была расчищена на высоту около 0,5–0,7 м. Она также имела выступы: верхний шириной 5 см и нижний (в западной части – до 5,0 см, в восточной отсутствовал). Кладки сходились в одну плоскость. Ниже стена была расчищена на высоту 0,15 м от выступа. Общая высота расчищенной стены – около 0,55 м, швы кладки узкие, кирпич малоформатный, 24…25 × 12,5 × 6,0 см, толщина стены – около 0,55 м.

Исследование стен «Крепости». Снятие штукатурки показало, что в основе «Крепости» находится каменная коробка здания конца XVIII в., от которого остались только внешние стены. Стены имеют значительные перекладки, равнозначные по масштабу и качеству выполнения по сравнению с первоначальными кладками XVIII в.

Снятие штукатурки на **северной стене** показало, что ни одного первоначального проёма без повреждений не сохранилось. Выявленные на первом этаже фрагменты лучковой арки и вертикальных откосов были остатками огромных проезжих ворот шириной более 3,6 м, начало их расчистки по первому этажу показало сохранившиеся следы окрашенной штукатурки. Справа и слева от бывших ворот, по всей видимости, имели место дверные проёмы, от которых сохранились фрагменты откосов. Характерной чертой выкладки откосов стала развёрнутая под углом кирпичная кладка с заполненными раствором углублениями (см. рисунки 2, 4:4, 4:6). По обеим сторонам ворот и возле одного дверного проёма на запад от них были прослежены выкладки штроб для перевязки некогда срубленных первоначальных поперечных стен.

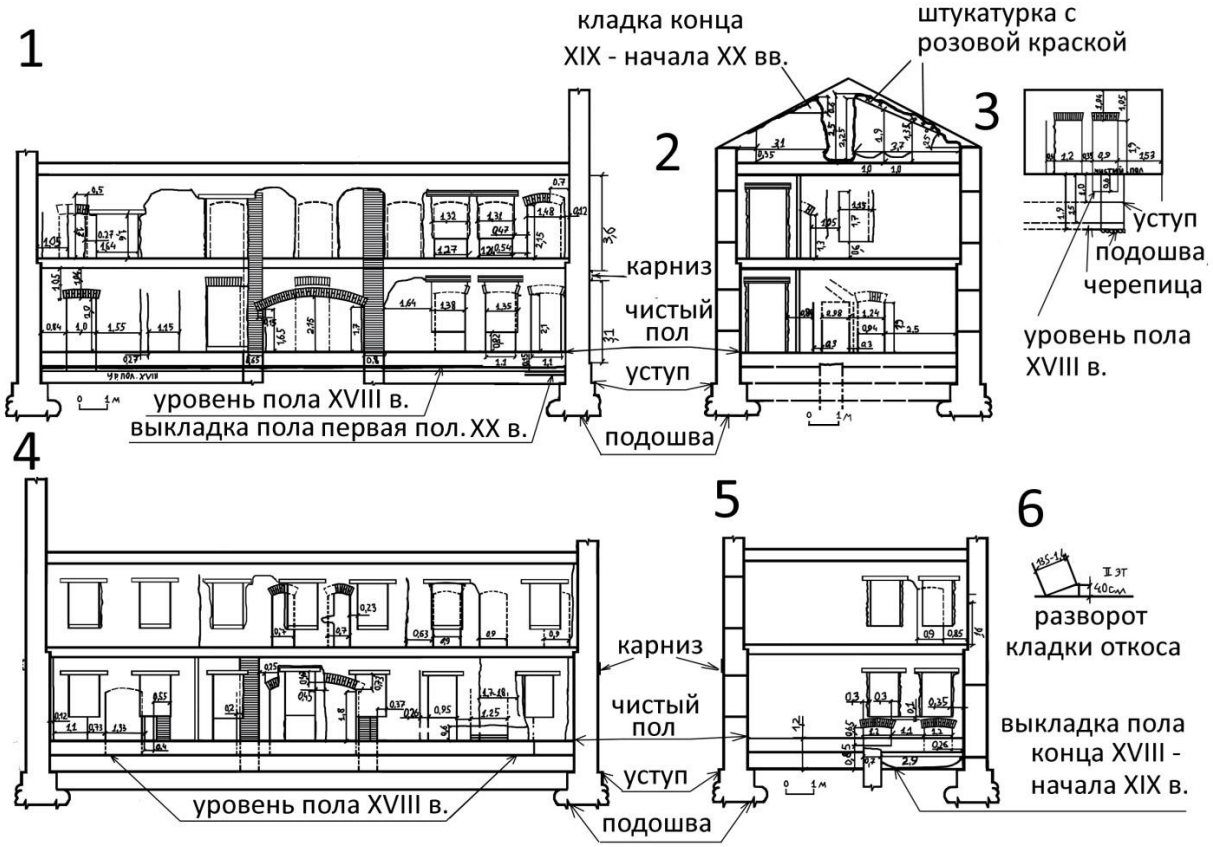
На уровне второго этажа на северной стене здания прослежены фрагменты очертаний ряда первоначальных окон, от которых сохранились остатки оконных ниш, расположенных в большинстве своём ниже уровня подоконников существующих окон. Характерной чертой выкладки их откосов также стала развёрнутая под углом кирпичная кладка с заполненными раствором углублениями. Большинство первоначальных оконных проёмов на уровне устья имело ширину около 0,9 м, но проёмы, расположенные над аркой проездных ворот, были более узкими. Сохранившиеся большие фрагменты (до 2/3 длины) их лучковых перемычек, выполненных в кирпич, позволяют предполагать их ширину в размере около 0,7 м и наличие между ними кирпичного простенка, поставленного по центральной оси арки ворот. Следы перевязки поперечных стен обнаружить не удалось из-за многочисленных перекладок.

Расчистки на **южной стене** также показали наличие заложенной арки ворот, пятки которой были глубоко заведены в кладку стены, и ряда первоначальных оконных и дверных проёмов различной степени сохранности на первом и втором этажах. На основе некоторых из них устроены современные окна, но их лучковые перемычки при этом выбили, заменив рельсами, поскольку первоначальные были ниже на 0,5 м. Характерная особенность окон – наличие оконных впадин со стороны помещений, что уподобляет их дверным проёмам. Судя по перекладкам, на западной части данной стены изначально было по четыре окна на верхнем этаже и три на нижнем. Одно окно располагалось над аркой проезда, и ещё одно имелось в восточной части на втором этаже. В отличие от северной стены, на уровне второго этажа были обнаружены и следы перевязки продолжавшихся здесь поперечных стен проезда. Неповреждённый дверной проём сохранился на первом этаже восточной части стены. Судя по всему, он вёл в пристройку, отмеченную на планах Полоцка конца XVIII – начала XIX вв. Следы оконного (или дверного) проёма располагались на втором этаже, но его большая часть была уничтожена перекладками и пробитым дверным проёмом, многократно переделанным в нишу (см. рисунки 2, 3, 4:1).

Остатки откосов оконных и дверных проёмов были прослежены в **западной стене** «Крепости», но сохранились они намного хуже из-за многочисленных перекладок. На уровне первого этажа размещались остатки

ниш с неоднократно перебитыми откосами. При пробивке дверного проёма были определены габариты одной из первоначальных ниш: ширина около 1,25 м, высота от пяты клинчатой перемычки до бетонного нового пола 1,75 м, глубина 0,45 м. На откосах уцелели покраски различными оттенками белого и серого колеров. Позднее ниша была перебита и смещена южнее на глубину 0,3 м, но полную ширину и высоту выяснить не удалось. Тогда же в стене был пробит обмазанный внутри известью канал диаметром около 20 см, он начинался от угла южной пяты перемычки первоначальной ниши и шел под уклоном около 45° в южном направлении. Новая ниша также имела окрашенную штукатурку (см. рисунки 2, 4:2).

В восточной стене «Крепости» были обнаружены проёмы, находившиеся ниже подоконников первого этажа. Они могли быть устроены для помещения подвала, верхние части кладок их клинчатых перемычек стали основой подоконников для пробитых позднее в XX в. окон первого этажа. При этом характер заполняющей проем кладки говорит о закладках либо в ходе строительства здания, либо в ближайшее после его окончания время. Южный проём, судя по его откосам, мог быть дверным, северный – оконным. Его заложили со стороны помещений здания при возведении стен, отгородивших юго-восточный угол проема в виде комнаты с кирпичным полом (см. рисунки 2, 4:3, 5).



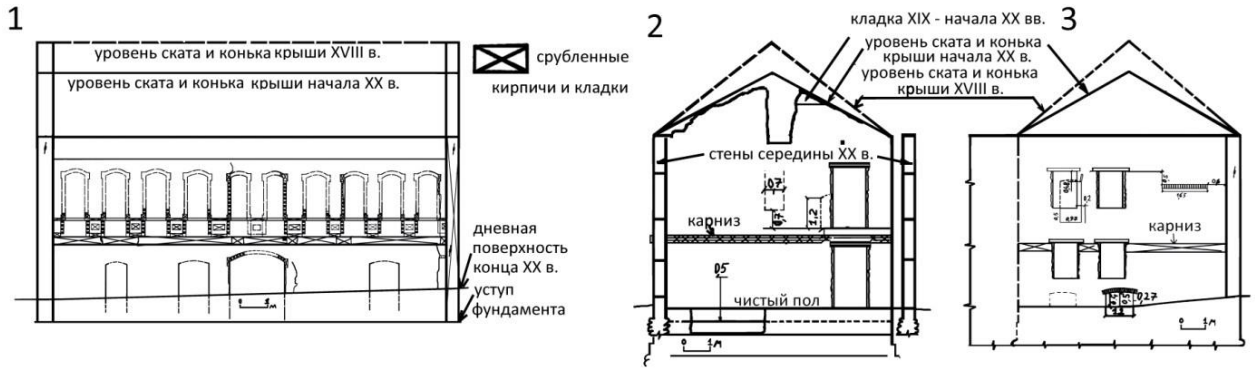
1 – южная стена с частичными промерами; 2 – западная стена с частичными промерами; 3 – фрагмент южной стены первого этажа, закрытый ранее пристройкой; 4 – северная стена с частичными промерами; 5 – западная стена с частичными промерами; 6 – разворот кладки кирпича

Рисунок 4. – Развёртки стен «Крепости» со стороны помещений

Стены первого этажа были толще верхнего на 15,0 и 30,0 см. Остатков срубленных сводов и первоначальных лестниц не обнаружено. При этом стоит отметить, что уровень существующего междуэтажного перекрытия является первоначальным. Таким образом, первоначальная высота первого этажа составляла около 3,5 м от уровня первоначального пола. Он располагался, относительно существующего, на глубине 0,5–0,6 м, об этом же говорит ряд конструкций нынешнего подполья: выступы стен, нижние уровни дверных проёмов, остатки кирпичного пола в юго-восточном углу здания и остатки обгоревшего пола.

Изучение чердака «Крепости» выявило только два фрагмента первоначального фронтона здания, его изначальные очертания не сохранились – кладка срублена, южный фрагмент имеет кладку из малоформатного кирпича высотой до 0,6 м. На восточной стороне фронтона прослежена полоса штукатурки, окрашенной в розовый цвет. На его нижней границе размещался отпечаток ската кровли, имевшей уклон около 25°, близкий к тому, что виден на фотографиях здания начала XX в. Остальные конструкции чердака относятся к периоду послевоенного восстановления.

Исследование фасадов здания позволило проследить ряд элементов первоначальной архитектуры и отразить их с помощью зондажей. Исследования **северного фасада** показали, что первоначальный проём ворот мог иметь массивное фигурное обрамление, частично выполненное в штукатурке (см. рисунки 2, 5:1). Для крепления были предусмотрены выпуски кладки через один ряд, сохранившиеся в виде срубленных кирпичей. Массивной выкладкой кирпича были усилены пяты арки проёма, откосы которого были частично растесаны на пол кирпича, при этом, видимо, были утрачены выкладки их обрамлений. Кладка арки ворот имела толщину в 1 кирпич и была выполнена с чередованием ложков и тычков. С западной стороны от ворот, видимо, располагались дверные проёмы, следы которых обнаружены со стороны помещений «Крепости», но украшения на их откосах проследить не удалось. Назначение выкладки из поставленного на кромку кирпича между крайним окном и срубленной северо-западной лопаткой выяснить не удалось. Два этажа здания разделял массивный карниз в четыре ряда кирпича, нижний из которых имел округлую вытеску торцов, тёсанных по лекалу.



1 – северный фасад с обозначенными срубленными кирпичными элементами;
2 – западный фасад с частичными промерами; 3 – восточный фасад с частичными промерами

Рисунок 5. – Частичная реконструкция фасадов «Крепости»

Более широкомасштабные зондажные работы по заказу архитектора-реставратора В.В. Глинника показали, что над проездом на втором этаже располагались два окна, имевшие массивные кирпичные обрамления, но в отличие от зданий коллегиума, откосы окон были выполнены выкладкой через ряд выступающими половинками кирпича, как у проёма ворот, для удержания накладного массива штукатурки. Уровень подоконников отмечал карниз в ряд кирпича. Расчистки уцелевших частей первоначальных откосов показали, что на уровне подоконников и пят они становились на 4,0 см шире, при этом здание первоначально было побелено, но вскоре его оштукатурили. Следов венчающего карниза не найдено, но, возможно, именно к нему относятся некоторые кирпичи, тёсанные по лекалу.

Имеющиеся перекладки участков северной стены, как и фотографии середины XX в., указывают, что первоначальные проёмы и архитектура фасада были утрачены ещё до Великой Отечественной войны. Уровень пола первого этажа подняли и прорубили окна современного образца, тогда же здание побелили, судя по следам сбитой штукатурки. При восстановлении здания после войны часть окон перебили и оштукатурили. При этом лопатка северо-западного угла была срублена при возведении пристройки с лестницей. Характерной особенностью кладок 50-х годов XX в. стало наличие в их составе жёлтого кирпича. В ходе восстановления северная стена (начиная от перемычек существующих окон второго этажа и до самой современной кровли) была полностью переложена, в силу чего уровень венчающего карниза или фриза выявить не удалось.

Исследования **южного фасада** показали, что в центральной части на уровне первого этажа располагалась широкая арка сквозного проезда. В западной части стены имелись три окна на первом этаже и четыре на втором. Восточная часть стены была закрыта пристройкой, следы которой в виде массива кладки обнаружены в составе восточной стены «Перемычки». Со стороны пристройки, кроме упомянутого дверного проёма, имелась аналогичная по очертанию ниша. На втором этаже замечены остатки дверного (оконного(?) проёма, на первом – очертания ниши и дверного проёма. При разборе верхних рядов кладки из разноформатного и разновременного кирпича найдены кирпичи с клеймом «СТ» [9, с. 89] и ряд лекальных образцов, часть которых относится к венчающему карнизу здания. Эти изделия имели округлую и скошенную вытеску торца со следами белых и серых покрасок. Данные находки указывают на крупные ремонты здания начала XX вв. От угла юго-западного здания начинался толстый кирпичный забор толщиной в 1½ кирпича в верхней части.

При разработке шурфа в «Перемычке» под стеной, принадлежащей «Крепости», также была зафиксирована конструкция её фундамента. Под полами прослежен восточный откос дверного проёма, дно которого находилось на глубине 0,6 м от чистого пола. Стена здания, в которой выполнен проём, была сложена в XVIII в.: на глубине 1,2 м начиналась тычковая кладка из крупноформатного кирпича 27,0 × 1,37…1,45 × 6,5…7,0 м, характерная для зданий XVIII в., её поверхность была срублена. Ранее кладка образовывала выступ шириной

в половину кирпича (≈ 15 см), первоначально уступ начинался на глубине 1,0 м от чистого пола. Участок сохранившегося уступа прослежен при расширении шурфа в западном направлении на 0,5–0,6 м в ходе дальнейшей расчистке стены. С глубины 1,5 м от чистового пола выступ подстилал слой извести с обломками волнистой черепицы XVIII в. Её толщина составляла 0,3 м, нижняя граница была расположена на глубине 1,8 м (с данного уровня прослежена и подошва бутового фундамента). Первоначальный культурный слой здесь был уничтожен в первой половине XX в. при прокладке канализационной трубы. Нетронутый однородный серый культурный слой сохранился в виде узкой вертикальной полосы толщиной 0,2 м возле фундамента «Крепости». Около уцелевшей части выступа была найден обломок голландской люльки XVIII в. (в районе бутового фундамента) и изразец-перемычка начала XIX в.

Исследования **восточного фасада** показали, что первоначально данная стена на уровне первого этажа не имела окон. Дверной или оконный проём находился на уровне второго этажа. Существующие ныне окна обоих этажей прорубили в первой половине XX в., под ними на уровне дневной поверхности прослежены замурованные проёмы первоначального подвального помещения (см. рисунки 2, 5:1). Вскоре, после возведения его стен, здание было ликвидировано (даже не достроено до конца), проёмы замуровали и устроили продольную стену, перевязанную с оставшейся закладкой. От пяты арки до подоконника высота первого проема составляла 0,27 м, на уровне замка арки – 0,3 м. Второй проем (высотой более 1,0 м) мог быть входом со стороны улицы. При расчистке закладки в полости найдены обломки бутылки конца XIX – начала XX вв. с надписью «LONDON…» на плечике. Подобные изделия производились на Ливанском заводе Юлиуса Фогеса в Юрьеве (ранее – Дерпт (1224–1893 гг.), ныне Тарту (с 1919 г.)) [2, с. 592], что позволяет датировать повторную закладку со стороны улицы концом XIX в. Между этажами имелось продолжение междуэтажного карниза. На уровне существующих окон второго этажа была выкладка кирпичом на кромку длиной 1,6 м, но её назначение неизвестно.

При исследовании **западного фасада** следов первоначальных оконных и дверных проёмов на уровне первого этажа найти не удалось. Возможно, их следы сохранились в виде неоднократно переделанных ниш, остатки которых найдены нами со стороны помещения. На фасадной стене сохранились остатки срубленного междуэтажного карниза. Два проёма, – дверной и оконный, – видимо, имели место на уровне второго этажа в южной части стены. Со стороны помещений и фасада уцелели фрагменты их откосов, на лицевой поверхности стены имеется множество обмазок раствором и слоёв побелок, что говорит о больших перекладках её внешнего слоя. Над уровнем перекрытия пристройки с лестницей были прослежены гнёзда для заведения деревянных конструкций из квадратных брусьев, которые могли быть строительными лесами здания.

Ещё одним конструктивным элементом исследуемого здания были железные связи, проушины и клинья которых обнаружены на восточном и северном фасадах. Их наличие было обусловлено лучковыми перемычками у первоначальных проёмов, дававших на стены большой распор (см. рисунки 2 и 5:2).

Интерпретация найденных конструкций и находок. Проведенные натурные исследования и имеющийся изобразительный материал показали, что северная часть комплекса бывшего «Гранд Отеля» («Крепость») было впервые отмечено на планах Полоцка 1786 и 1793 гг. в виде прямоугольника с пристройкой в восточной части южного фасада. В ходе строительства дома его фундаменты заложили на глубину около 1,2 м от дневной поверхности XVIII в. (исследования шурфов показали, что на момент начала строительства она располагалась на глубине 1,0–1,2 м от современной). Об этом говорят как нижние уровни первоначальных дверных проёмов, так и уступы фундаментных частей стен, расположенных на глубине около 1,3–1,5 м от современной дневной поверхности. Сами фундаменты имели широкие (до 1,5 м) булыжные подошвы, сложенные на известковом растворе. Толщина их составляла более 0,3 м. С внешней стороны фундамента был обнаружен слой битой черепицы, уложенной насухо между бутовой подошвой и кирпичной кладкой. Это было связано со спецификой грунта, на котором закладывалось здание: он представлял собой насыщенный влагой чёрный культурный слой, хорошо сохраняющий органические материалы. Таким образом строители старались создать для стен устойчивую опору и с помощью битой черепицы дренировать прилегающую к кирпичной кладке землю, сводя к минимуму подсос влаги и сырость на первом этаже.

Первоначально строители возвели только коробку внешних стен здания и две несущие стены, отделившие проезд во внутренний двор от остальных частей здания. При этом на уровне второго этажа стены проезда к северному фасаду перевязки не имели. Это обстоятельство, как и часть перекладок внешних стен здания, говорили о том, что ещё в ходе его строительства в первоначальный проект были внесены изменения. Это же подтверждает и возведение дополнительных несущих капитальных стен в его восточной и западной частях, не имевших перевязки с остальными. При этом первоначально запланированный подвал (склеп(?) в его юго-восточной части был ликвидирован, окно и дверь склепа замуровали, перевязав с закладками новую стену. В северной стене нового помещения был вход, который, судя по стёршимся кирпичам низа проёма, имел ширину около 1,0 м (откосы не сохранились). Пол образованного ими помещения замостили половинками и целыми кирпичами XVII – XVIII вв., имевшими следы нагара.

Остальные помещения, вероятно, первоначально имели деревянные полы. Деревянными были также все перекрытия здания. Судя по стратиграфии шурфа в северо-восточном углу здания, они размещались над выступом, первоначально под ними имелось неглубокое подполье около 0,7 м высотой. Имевшийся слой строительного мусора, расположенного на уровне выступов, содержал обломки штукатурки, гладких терракотовых из-

разцов и черепицы первой половины XIX в., связанных с первоначальными интерьерами и кровлей здания. Он мог отложиться при восстановлении здания после пожара 1871 г., выше его перекрывали остатки угля. О наличии у здания первоначальной черепичной кровли говорит и завал черепицы первой половины XIX в. с фрагментами обмазки между пластинами, который обнаружен возле западного фасада под остатками булыжного мощения вместе с изделиями стекла и керамики XIX – начала XX вв. Её могли выбросить после пожара 1871 г. [3, с. 297]. Тогда же понизили и фронтон здания, срубив его верхнюю часть: на фотографиях конца XIX в. – начала XX в. он уже низкий [4, с. 143; 5, с. 120].

Первоначально главный северный фасад здания был приближен к симметрии. На первом этаже имелась широкая лучковая арка проезда с массивным обрамлением, устроенным по выступающим кирпичам. С обеих сторон проезда располагался ряд дверных проёмов. От верхнего этажа нижний отделял карниз из четырёх рядов кирпича, верхний и нижний ряд которых имел вытеску по лекалу. При этом верхний этаж нависал над нижним. Выше следовали оконные проёмы с массивными обрамлениями, уровень подоконника которых подчёркивал поясок. Простенки на уровне подоконной части стен имели выступающие панели. Весь декор выполнялся из штукатурки по выступающим кирпичам. Судя по выступам срубленной кладки, ворота и оконные проёмы второго этажа имели массивные штукатурные обрамления толщиной до 16–17 см, схожие очертаниями с убранством центрального окна доминиканского костёла [10, с. 388: рис. 4.4.29, с. 391: рис. 4.4.39]. Штукатурились также, видимо, выступающие панели, карнизы и лопатки на углах. Основные плоскости стен 3–4 раза белились известью белого и жёлтого (золотистого) цвета по штукатурной кладке, имевшей косую подрезку швов, характерную для зданий конца XVIII в. [9, с. 155]. Рисунок кладки и имевшиеся в ходе строительства здания перестройки были «приглушёны» несколькими слоями побелки. Позже здание было оштукатурено полностью и выкрашено жёлтой охрой (с подведением контуров рельефов краснокоричневыми(?) колерами), при этом исправлялась штукатурка карниза и обрамлений проёмов.

Проёмы с восточного и западного фасада здания могли быть связаны с существованием внешней деревянной лестницы второго этажа, следы крепежа которой внутри помещения нам обнаружить не удалось.

По всей видимости, первоначальным назначением здания было размещение в нём почтового двора, который в начале XIX в. был отмечен как огромное сооружение с внутренним двором и главными фасадами, обращёнными на ул. Витебскую (северная сторона проспекта Ф. Скорины) и ул. Спасскую (ныне Советская). Об этом же говорит и размещение на центральной оси его двора фасада широкого проезда с лучковой аркой. Данная специфика здания была отражена в его планировке и расположении первоначальных проёмов первого этажа. Все окна были обращены на юг во двор, а входы, как и ворота, – на ул. Спасскую. В юго-восточной части здания, видимо, находилось хранилище особо ценных грузов с окном и входом, обращёнными на восток. Позднее его реконструировали путём возведения дополнительных стен и кирпичного пола. Верхний этаж здания, видимо, занимали жильё и кабинеты служащих. Когда почтовый двор перенесли в другое место, это здание продали, и новый владелец приспособил его для гостиницы или заезжего дома. Планировка проёмов и внутренних несущих стен первого этажа позволяла расположить внизу склады и корчму, обращённую окнами на юг. Подобный план корчм известен по описаниям имений и археологическим исследованиям на территории Беларуси [1. с. 189: мал. 67]. Второй этаж, как и ранее, был жилым, там разместили комнаты постояльцев. Видимо, тогда в западной стене пробили дымоход и перенесли нишу.

Над описанным слоем с черепицей и изразцами, выявленном в шурфе в северо-восточном углу, следовали слои угля, извести (вероятно, связан с восстановительными работами), земли с песком и песчаная прослойка (все без артефактов), надёжно перекрывшие его и связанные с функционированием восстановленного здания. Все эти отложения перекрыл слой кирпичного боя с печной глиной. Он мог быть связан с ремонтом здания после пожара 1912 г. и находился на глубине 0,5 м от нынешнего пола, что говорит о первом поднятии пола в здании на 0,2 м от прежнего уровня. Над этим слоем до самого имевшегося деревянного пола следовали слои земли и относящегося ко второй половине XX в. мусора. С пожаром 1912 г. связаны и два слоя, перекрывшие кирпичный пол в юго-восточном помещении первого этажа. Частично прослеженный слой извести, вероятно, связан с восстановительными работами после пожара. Выше него следовал слой угля, где содержались обломки и целые образцы стеклянной, керамической и фарфоровой посуды, фрагменты большого фигурного изразца-навершия печи (вероятно, обрушилась при пожаре сверху) и венчика каменного сосуда (ступы(?), крышки, сита. При этом ряд артефактов имел повреждения огнём. Таким образом, данное помещение могло быть частью кухни «Гранд-Отеля» или её складом.

Здание, как и прежде, использовалось как заезжий дом или мебелированные комнаты, которые, по данным Путеводителя по г. Полоцку 1910 г., в большом количестве сосредоточивались именно на ул. Спасской. Но теперь его, вероятно, приобрёл владелец гостиницы «Гранд-Отель», соединив оба здания перемычкой, западный фасад которого нами обнаружен в составе нынешнего корпуса «Перемычки». Тогда же вместе с черепицей у западного фасада оказались обломки керамической, стеклянной, фарфоровой и фаянсовой (ранний Кузнецов) посудой. Особый интерес представлял обломок дна оплавленного медного подсвечника, выброшенного при восстановлении здания после пожара 1912 г. Возможно, ещё до пожара 1912 г. и последующего восстановления зданий гостиницы его уже выкупил владелец «Гранд Отеля» и, разобрав пристройку у южного фасада, объединил «Перемычкой» со зданием XVIII в., стоявшим на месте «Сталинки».

Первоначальная внутренняя планировка здания «Крепости» частично сохранялась до начала Великой Отечественной войны, тогда как первоначальные проёмы фасадов и их архитектура были полностью уничтожены. Оконные и дверные проёмы по форме и размещению приблизили к существующим. При этом пол первого этажа был поднят на высоту около 0,7–0,8 м из-за нарастания культурного слоя и подъёма дневной поверхности на ул. Советская. В южной части здания был обнаружен ряд артефактов, связанных с функционированием помещения до начала Великой Отечественной войны – обломки керамических, стеклянных и металлических изделий первой половины XX в., часть которых, по всей видимости, бытовала до 1941 г. К началу XX в. относятся обломки мраморной столешницы, медной сковороды, белого кафеля, ряда фрагментов стеклянной и фарфоровой посуды. К изделиям 20-х – 40-х гг. XX в. относятся окуляры противогаза(?), игрушечная посуда, стеклянные, керамические и фаянсовые сосуды с клеймами советских и иностранных производителей. Ряд предметов был связан с электрической проводкой здания. При этом часть бутылок и флаконов были оплавлены в пожаре, уничтожившем постройку в 40-х годах XX в.

Во время Великой Отечественной войны здание выгорело изнутри, оплавленная стеклянная, керамическая и фаянсовая посуда говорила о силе пожара. При его восстановлении все несущие внутренние стены заменили каркасом из кирпичных столбов и металлических балок, роль которых играли списанные рельсы, датированные 1894, 1902, 1904 годами, с надписью «Нов. Рос. Общ. Жд», при этом все существовавшие до этого элементы планировок и печного отопления были полностью уничтожены. Для новых конструкций и печей возвели мощные фундаменты из булыжного камня, аналогичного тому, что создавался для послевоенных конструкций «Сталинки». Все остальные части здания были деревянными. Примыкавшая к нему с юга «Перемычка» была расширена, и для соединения обоих строений в «Крепости» прорубили новые оконные и дверные проёмы и ниши на южной и северной стенах.

Заключение. Проведенные натурные исследования северной части комплекса бывшего «Гранд Отеля» позволили выявить ряд элементов его первоначальной архитектуры, конструкций и планировки, неизвестных по имеющимся сегодня изобразительным и письменным источникам. На их основе предлагается частичная реконструкция первоначальных фасадов и планировки здания. Также было установлено время его возведения и поздних перестроек, связанных со сменой функционального назначения. В частности, установлено, что начало XX в. в истории здания стало временем его вхождения в состав гостиничного комплекса «Гранд Отель» в качестве северного крыла. Оно имело второстепенное значение и было занято дешевыми номерами гостиницы. В ходе перестроек 30–40-х годов XX в. и восстановления после Великой Отечественной войны помещение приобрело облик и планировку, существовавшие до начала работ в 2019 г. Выявленные артефакты и конструкции оказали непосредственное влияние на ход строительных работ по данному зданию, в частности, многие из них были сохранены и показаны зондажами в запроектированных интерьерах, став доступными для обзора как горожанами, так и посетителями гостиницы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Археалогія Беларусі у 4 т. – Т. 4: Помнікі XIV–XVIII стст. / В.М. Ляўко, М.Ф. Гурын, Ю.А. Заяці інш.; Пад рэд. В.М. Ляўко і інш. – Минск: Беларус. навука, 2001. – 597 с.
2. Дэйніс І.П. Полацкая даўніна. – Мінск: Медисонт, 2007. – 328 с.
3. Каталог старинных бутылок для пива, кваса, фруктовых и минеральных вод / Сост. С.А. Попков. – 9 изд., дополн. и исправл. – Ростов-на-Дону, 2014. – 623 с.
4. Ліхадзедаў У.А. Полацк – першая сталіца = Полоцк – первая столица = Polotsk – First capital. – Мінск: Белстан, 2022. – 288 с. (У пошуках страчанага).
5. Полоцкое Радование: Свято-Евфросиниевские Торжества 1910 года / ред. А.Г. Борисова-Горюнова; худ. А.П. Маковцов. – Полоцк: Свято-Евфросиниевский женский монастырь в г. Полоцке Полоцкой епархии Белорусской Православной Церкви, 2010. – 437 с.
6. Салаўёў А.А. Вынікі натурных даследванняў на другім і трэццім паверхах корпуса «А» Полацкага езуіцкага калегіума пад час яго мадэрнізацыі // Матэрыялы навукова-практычнай канферэнцыі (па выніках навукова-даследчай работы ў 2006 г.) / уклад. Т.А. Джумантаева. – Полацк: НПГКМЗ, 2007. – С. 33–80.
7. Салаўёў А.А. Археалагічнае вывучэнне паддашша корпусаў «А» і «Г» // Матэрыялы навукова-практычнай канферэнцыі (па выніках навукова-даследчай работы ў 2007 г.) / уклад. Т.А. Джумантаева. – Полацк: НПГКМЗ, 2008. – С. 79–100.
8. Соловьёв А.А. Итоги архитектурно-археологического изучения бывшей иезуитской бурсы // Беларускае Падзвінне: вопыт методыка і вынікі палявых і міждысцыплінарных даследаванняў: зб. навук. арт. III міжнар. навук. канф., Полацк, 14–15 крас. 2016 г.: у 2 ч. / Полацк. дзярж. ун–т; пад агул. рэд. Д.У. Дука, У.А. Лобача, А.І. Корсак. – Наваполацк: ПДУ, 2016. – Ч. 1. – С. 155–166.
9. 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.
10. Чантурия Ю.В. Белорусское градостроительное искусство: средневековое наследие, ренессанс, барокко, классицизм в контексте европейского зодчества. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 503 с.

REFERENCES

1. Lyauko, V.M. (Eds.) (2001). *Arhealogiya Belarusi:* v 4 t. T. 4 Pomniki XIV–XVIII stst. Mihsk: Belaruskaya navuka. (In Belarus.).
2. Deinis, I.P. (2007). *Polatskaya daunina*. Minsk: Medisont. (In Belarus.).
3. Popkov, S.A. (Eds.) (2014). *Katalog starinnykh butylok dlya piva, kvasa, fruktovykh i mineral'nykh vod*. Rostov-on-Don. (In Russ.).
4. Lihadzedau, U.A. (2022). *Polatsk – pershaya stalitsa = Polotsk – pervaya stolitsa [Polotsk – First capital]*. Minsk: Belstan (In Russ., in Belarus., in Engl.).
5. Borisova-Goryunova, A.G. (Eds.) (2010). *Polotskoe Radovanie: Svyato-Evfrosinievskie Torzhestva 1910 goda*. Polotsk: Svyato-Evfrosinievskii zhenskii monastyr'. (In Russ.).
6. Salaueu, A.A. (2007). Vyniki naturnykh dasledvannyau na drugim i tretstsim paverkhakh korpusa «A» Polatskaga ezuitskaga kalegiuma pad chas yago madernizatsyi. In T.A. Dzhumantaeva (Eds.) *Materyyaly navukova-praktychnai kanferentsyi (pa vynikakh navukova-dasledchai raboty u 2006 g.)* (33–80). Polotsk: NPGKMZ. (In Belarus.).
7. Salaueu, A.A. (2008). Arkhealagichnae vyvuchenne paddashsha korpusau «A» i «G». In T.A. Dzhumantaeva (Eds.) *Materyyaly navukova-praktychnai kanferentsyi (pa vynikakh navukova-dasledchai raboty u 2007 g.)* (79–100). Polotsk: NPGKMZ. (In Belarus.).
8. Salaueu, A.A. (2016). Itogi arkhitekturno-arkheologicheskogo izucheniya byvshei iezuitskoi bursy. In D.U. Duk, U.A. Lobach, A.I. Korsak (Eds.) *Belaruskae Padzvinne: vopyt metodyka i vyniki palyavykh i mizhdystsyplinarnykh dasledavannyau*. In 2 p. P. 1 (155–166). Novopolotsk: PSU. (In Belarus.).
9. Salaueu, 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 svyatle stanaulennya gistarychnykh i natsyyanal'nykh form belaruskai dzyarzhaunastsi (IX–XX stst.)* (77–96). Magileu: MDU imya A.A. Kulyashova. (In Belarus.).
10. Chanturiya, Yu.V. (2017). *Belorusskoe gradostroitel'noe iskusstvo: srednevekovoe nasledie, renessans, barokko, klassitsizm v kontekste evropeiskogo zodchestva*. Minsk: Belaruskaya navuka. (In Russ.).

Поступила 14.10.2022

FIELD INVESTIGATIONS OF THE NORTHERN PART OF THE FORMER “GRAND HOTEL” COMPLEX

A. SALAUEU
(Polotsk National Historical and Cultural Museum-Reserve)

The article presents the results of a full-scale study of one of the buildings of the complex of buildings of the former guestnitsa "Grand Hotel", carried out in the course of construction work. This object is located in the center of the historical part of Polotsk at F. Skorina Avenue, 3 and 5. We assumed the presence in its composition of earlier monumental structures of the 17th – 18th centuries. and connection movable artifacts associated with them. During the study of the existing building, a box of external walls of the building of the late 18th century was revealed, as well as artifacts related to its history are taken. A number of elements of the original layouts and architectural decoration, traces of later reconstruction of the building and found movable artifacts related with the institutions located there.

Keywords: *"Grand Hotel", field studies, urban architecture, pits, reconstruction.*

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 004.942:528.2/.3 **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-74-81**

ПРОГРАММНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ГИС-ПРОЕКТА «ГЕОДИНАМИКА И ТЕХНОГЕНЕЗ БЕЛАРУСИ»

П.С. ДОЛГИЙ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье рассматриваются проблемные моменты структурирования данных ГИС-проекта «Геодинамика и техногенез Беларуси», разработанного автором ранее, при переходе от настольной к клиент-серверной форме. Отражено текущее состояние проекта, приведена его структура. Описан алгоритм зонирования территорий по комплексному показателю геологической опасности, который реализован в проекте в виде модуля. Выявляются слабые стороны настольной формы ГИС-проекта с данными, хранящимися в шейп-файлах. Отдельно рассматриваются технологии хранения данных, их обработки на сервере, предоставления пользователям, и выявляются их преимущества и недостатки. На примере составного слоя деформаций показан фрагмент веб приложения на основе GeoServer и OpenLayers. Вносятся предложения по реализации структуры клиент-серверного ГИС-проекта. Статья может быть полезна студентам и специалистам, изучающим технологии разработки веб-ориентированных ГИС-проектов.

Ключевые слова: *ГИС-проект, структурирование данных, сервер, клиент, база данных, PostGIS, GeoServer.*

Перечень принятых сокращений: *ГИС – географическая информационная система, СДЗК – современные движения земной коры, СВДЗК – современные вертикальные движения земной коры, СУБД – система управления базами данных, ЦМР – цифровая модель рельефа, ССТП – спутниковая система точного позиционирования, САПР – система автоматизированного проектирования, HTTP – HyperText Transfer Protocol.*

Введение. Автор в своих прежних статьях [1] рассказывал о разрабатываемом в Полоцком государственном университете имени Евфросинии Полоцкой ГИС-проекте «Геодинамика и техногенез Беларуси», который включает объекты, сами по себе вызывающие интерес с точки зрения тектонической активности как природного, так и техногенного происхождения (разломы кристаллического фундамента и платформенного чехла различной глубины, возраста и генезиса; космолинеаменты, кольцевые структуры, разрабатываемые месторождения полезных ископаемых), а также ответственные инженерные сооружения, которые подвержены влиянию движений земной коры и в случае аварии могут нанести ещё более серьезный ущерб окружающей среде (атомные и гидроэлектростанции, магистральные трубопроводы). Проект позволяет хранить исходные данные в удобном для обработки и анализа виде, публиковать результаты выполненных исследований, а также планировать новые. С момента предыдущих публикаций в проект были добавлены новые слои, конкретизирована его структура и классификация слоев.

Слои, имеющие общую тематику, объединялись в составные слои. Составные слои, построенные по данным близких научных дисциплин, объединялись в тематические разделы.

Текущее состояние ГИС-проекта «Геодинамика и техногенез Беларуси». Пять из шести тематических разделов хранят исходные данные. Шестой служит для демонстрации результатов выполненных исследований и составления различных карт путем совмещения разных слоев их других тематических разделов. К тематическому разделу Результаты исследований относятся также модули пространственного анализа. В частности, автором разработан модуль оценки геологической опасности территорий по комплексному показателю.

Поскольку в проекте имеются результаты обработки повторных ГНСС-наблюдений, выраженные в виде компонентов деформации, относящихся к треугольникам, в качестве конечных элементов для вычисления индекса также примем эти треугольники.

Комплексный индекс геологической опасности для каждого треугольника вычисляется по формуле (1):

$$P = p_{\text{осн}1} + p_{\text{осн}2} + \cdots + p_{\text{осн}i} + p_{\text{доп}1} + p_{\text{доп}2} + \cdots + p_{\text{доп}i}, \quad (1)$$

где P – интегральный индекс;

$p_{\text{осн}i}$ – i-й основной критерий;

$p_{\text{доп}i}$ – i-й дополнительный критерий.

Количество основных и дополнительных критериев может меняться в зависимости от наличия тех или иных данных. Все описанные показатели имеют различную величину. Чтобы учесть их вместе, необходимо привести показатели к единой балльной шкале. Для этого будем вычислять долю данного значения от максимального для всех исследуемых треугольников в процентах. В нашем случае имеем следующие основные показатели.

$$p_{\text{осн}1} = \sum_{n=1}^{N} \gamma_m, \tag{2}$$

где $p_{\text{осн}1}$ – сумма модулей сдвига за рассматриваемый период;

n – номер эпохи;

m – число эпох, входящих в период.

Второй из основных критериев – среднее значение современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК), определенных методом повторного высокоточного нивелирования для территории треугольника.

$$p_{\text{осн}2} = v_{max} - v_{min}, \tag{3}$$

где V_{max}, V_{min} – максимальное значение скорости СДЗК для данного треугольника.

Другой способ измерения СВДЗК, однако уступающий по точности геометрическому нивелированию и сильно зависящий от характера отражающей поверхности, – радарная интерферометрическая съемка. Критерий ($p_{\text{осн}3}$) для данного способа вычисляется аналогично третьему.

Линеаментный анализ не дает количественной характеристики геодинамических явлений, но выявленные в его результате линейные (кольцевые) структуры могут косвенно свидетельствовать о геодинамической опасности активных разломов. Критерий $p_{\text{осн}4}$ будем рассчитывать как отношение суммарной длины штрихов, выявленных в результате анализа, к площади треугольника:

$$p_{\text{осн}4} = \frac{\sum l}{S_{\text{тр}}}. \tag{4}$$

Аналогично вычисляется $p_{\text{осн}5}$ для разломов, выявленных по геофизическим данным (по монографии А.С. Махнача [2] и т.п.).

В качестве первого дополнительного критерия $p_{\text{доп}1}$ введем сумму магнитуд сейсмических событий, произошедших на исследуемой территории в прошлом. При этом, события, происходившие в прошлые эпохи, в меньшей степени представляют опасность, чем события, регулярно наблюдаемые в современную эпоху. Так же, как и более удаленные события менее опасны, чем происходящие в непосредственной близости. Поэтому для данного критерия введем коэффициенты. Первый из них обратно зависит от количества лет, прошедших со времени события. Второй – учитывает расстояние до очага события. В результате получится малая величина, поэтому, чтобы привести показатель к общей шкале, изначальное значение магнитуды умножается на 100.

$$p_{\text{доп}1} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{T}\frac{1}{D} M_i \cdot 100, \tag{5}$$

где $\frac{1}{T}$ – коэффициент (T – число лет, прошедших со времени сейсмического события);

$\frac{1}{D}$ – коэффициент (D – расстояние от центра данного треугольника до очага события в км);

M – магнитуда события;

N – суммарное количество событий, произошедших в пределах рассматриваемого треугольника.

И, наконец, второй дополнительный критерий $p_{\text{доп}2}$ учитывает количество действующих месторождений полезных ископаемых в пределах треугольника.

Показатели присоединяются к полигональному слою при помощи инструментов присоединения атрибутов по местоположению и зональной статистики, после чего вычисляется комплексный показатель по формуле (1). Конечные элементы раскрашиваются различными цветами с помощью интервальной шкалы (рисунок 1).

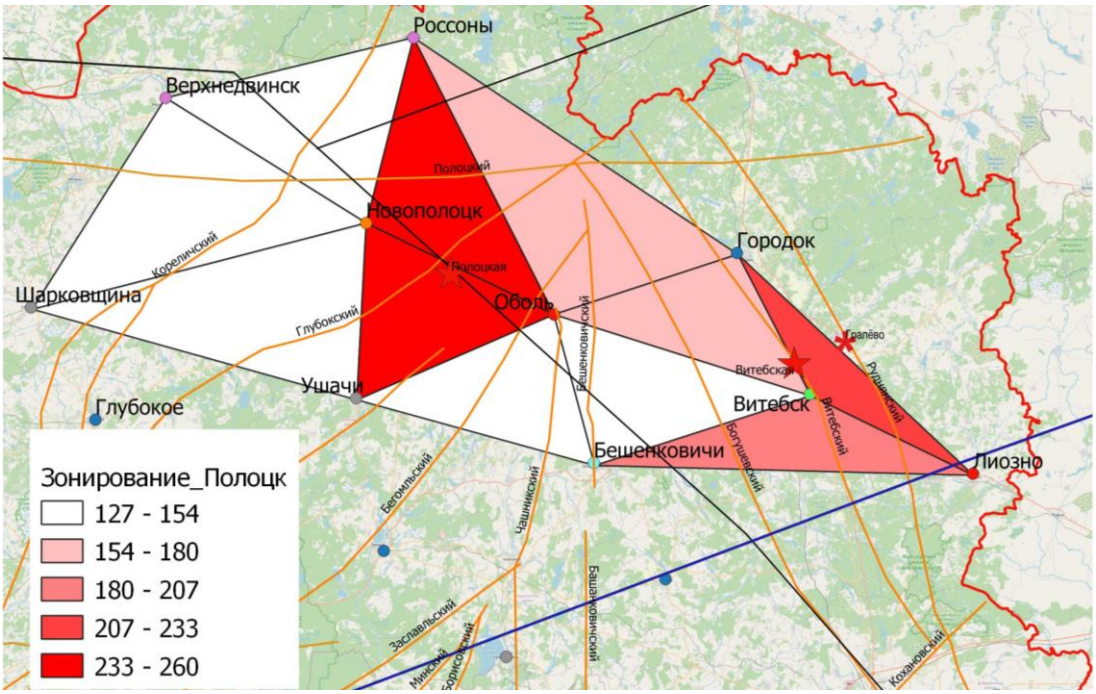


Рисунок 1. – Зонирование территории по комплексному показателю геологической опасности

Таким образом, в проекте выделяется три структурных уровня. Структура проекта приобрела вид, представленный на рисунке 2. При этом структурировать данные проекта необходимо как в среде самого ГИС-проекта, так и в базе данных либо файловой системе (если база данных не используется).

В нашем проекте составные слои создавались путем группировки слоев. Тематические разделы выделялись путем группировки составных слоев в группы второго уровня. Групповые слои сохранялись в файл описания слоя с расширением .qlr и в дальнейшем, в случае необходимости, могут быть загружены в другой проект.

Такой слой хранит только ссылки на слои, стили их отображения и систему координат, но не геометрию. Хранить файл описания слоя необходимо в одной директории с используемыми в нем слоями.

Проблема структурирования данных. Структурирование данных проекта в QGIS путем группировки слоев имеет свои недостатки. Она удобна только для отображения нужных слоев в таблице содержания и на карте. При использовании инструментов геообработки и анализа при большом количестве слоев возникают сложности. Так, в разных составных слоях могут оказаться слои с одинаковым именем. В окнах инструментов слои никак не группируются, а отображаются в алфавитном порядке. Чтобы не ошибиться с выбором нужного слоя, перед использованием инструмента такой слой желательно переименовать, что влечет за собой дополнительные затраты времени и неудобства в дальнейшем использовании проекта.

Рассмотрим другие варианты структурирования данных в проекте QGIS, такие как темы карты и подключение внешнего проекта.

Использование тем карты удобно для совместного просмотра слоев и для составления макетов, поскольку в настройках карты в макете можно включить только одну конкретную тему и при этом из легенды, поставив флажок «Показывать элементы только внутри связанной карты», можно убрать «лишние» слои. Темы карты также не помогают группировать слои при использовании инструментов геообработки.

Следующий вариант структуризации проекта в QGIS – сохранить каждый тематический раздел в отдельный подпроект, а затем, по мере необходимости, собирать их в общем проекте с помощью функции «Встроить слои и группы». Использование подпроектов упрощает работу с инструментами геообработки и анализа, но при подключении внешнего проекта оказываются недоступными многие возможности слоев: редактирование и настройка стилей отображения.

В файловой системе тематические разделы проекта представлены в виде папок, а файлы, относящиеся к одному составному слою, также собраны в папки. При необходимости количество уровней в дереве папок может быть увеличено, например, для хранения слоев, представляющих разные временные эпохи. При использовании пространственных баз данных структура файлов будет определяться особенностями используемой системы управления базами данных (СУБД). СУБД и структуру данных в них мы рассмотрим ниже.

Для дальнейшего развития проекта – внедрения возможностей многопользовательского доступа, публикации на Интернет-ресурсах – необходимо уходить от локального проекта, хранящегося на одном персональном компьютере, к клиент-серверной форме организации проекта. При такой форме данные хранятся на удаленном компьютере – сервере, а конечные пользователи – клиенты – получают данные с сервера посредством специальных стандартов передачи информации.

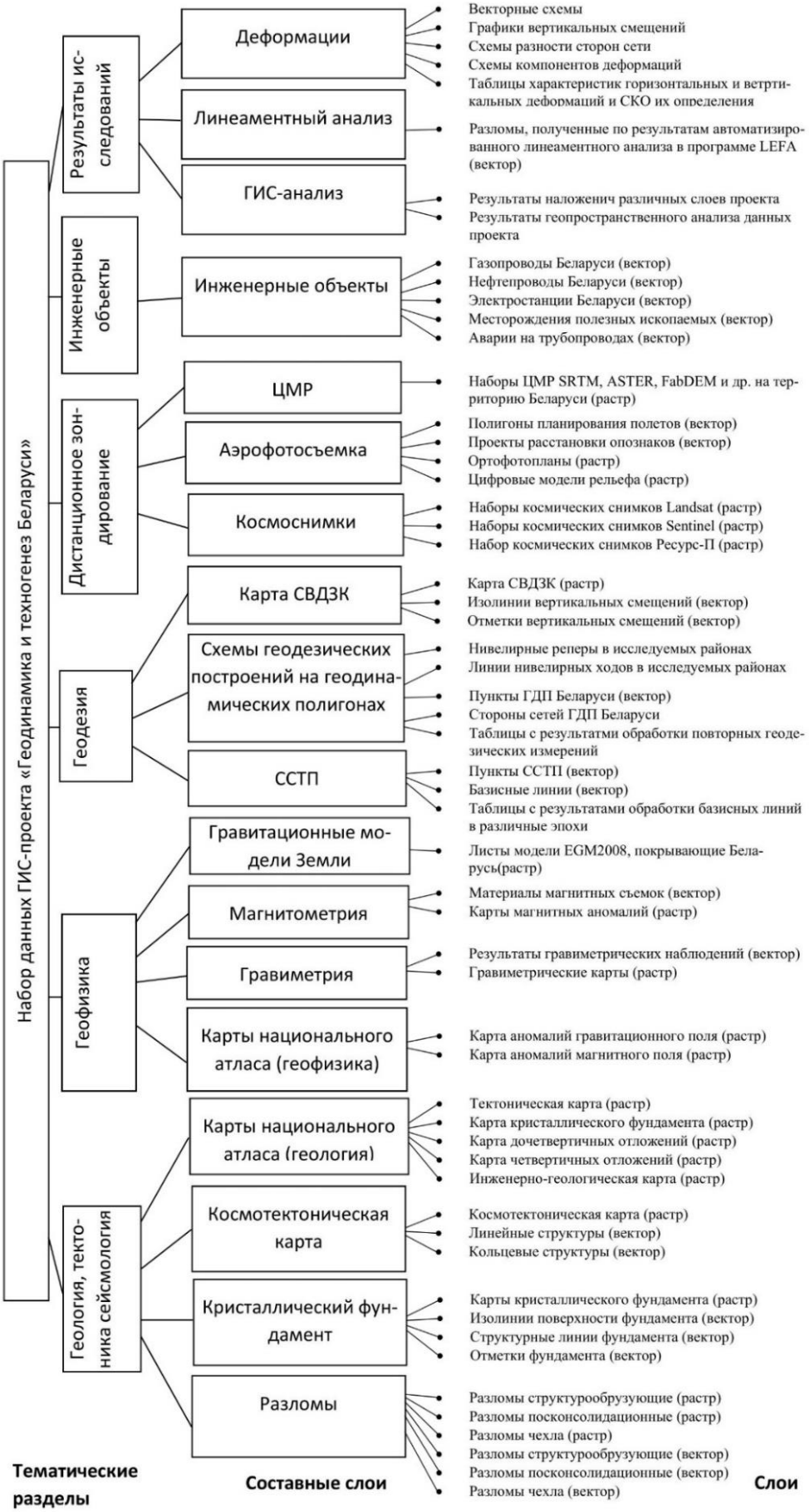


Рисунок 2. – структура данных ГИС-проекта «Геодинамика и техногенез Беларуси»

Технологии реализации клиент-серверного ГИС-проекта. Рассмотрим последовательно технологии, которые позволяют реализовать клиент-серверный ГИС-проект.

Во-первых, на сервере необходимо организовать хранилище данных и определиться с форматом их хранения. Векторные слои в настольной версии ГИС-проекта «Геодинамика и техногенез Беларуси» в основном представлены шейп-файлами (shapefile). Формат шейп-файла разработан компанией ESRI в начале 1990-х годов и по сей день остается одним из самых популярных. Бинарный, но при этом открытый, он получил поддержку практически во всех геоинформационных пакетах, а также стал обменным форматом между системами автоматизированного проектирования (САПР) и ГИС. Шейп-файлы быстро отображаются на карте, хорошо архивируются. Однако с развитием и укрупнением ГИС-систем выявились некоторые недостатки шейп-файла:

– для ссылок внутри файла используются 4-байтные числа, поэтому размер шейп-файла не может превышать 2 ГБ[1];

– количество полей в атрибутивной таблице не может превышать 255;

– поддерживаются только форматы атрибутивных полей типов float (число с плавающей точкой), integer (целое число), date (дата и время) и string (строка). При этом имеются ограничения и по размеру значений. Значение типа float не может содержать более 13 знаков, integer – более 9, date – 8, string – 254;

– имя атрибутивного поля не может быть длиннее 10 символов при латинском наименовании и 5 при кириллическом. Столь короткие значения атрибутов могут быть непонятны конечному пользователю данных;

– в шейп-файлах не хранятся напрямую значения допуска координат (x;y) – минимального расстояния между вершинами, ближе которого они будут считаться идентичными. Поэтому при выполнении оверлейных операций может несколько ухудшаться точность результирующих слоев, появляться осколочные объекты;

– шейп-файл позволяет хранить трехмерные объекты типа Multipatch, однако не поддерживает текстуры и их координаты или частичное окрашивание, а также нормали освещенности[2];

– малоэффективен пространственный индекс шейп-файлов по сравнению с аналогичным у баз данных. Разница в скорости обработки заметна при больших объемах данных;

– невозможно хранить параметрически заданные кривые. Описание кривых возможно только путем их аппроксимации отрезками;

– нет возможности хранить кодировку данных. При неизвестной кодировке часто возникают проблемы с чтением текстовых атрибутивных полей;

– многофайловая структура данных. В шейп-файле пространственная, атрибутивная, стилистическая информация, а также сведения о системе координат хранятся в отдельных файлах, в результате чего уменьшается скорость передачи данных и повышается риск потери их целостности;

– при этом каждый отдельный шейп-файл может хранить только один слой определенного типа (точечный, линейный, полигональный);

– структура данных «плоская», шейп-файлы не хранят связи между таблицами и их иерархию[3].

В крупных ГИС-проектах в настоящее время используются базы геопространственных данных, такие как файловая и персональная базы данных ESRI, PostGIS, Spatial Lite, MSSQL Spatial, DB2 Spatial, Oracle Spatial, ArcSDE и др. Функционал баз данных Spatial Lite поддерживается также форматом Geopackage.

Отмечается[4], что программный продукт PostGIS, который является геоинформационным расширением свободно распространяемой СУБД PostgreSQL, имеет более богатый функционал, чем некоторые коммерческие СУБД, такие как Oracle Spatial, DB2 Spatial Extender, Informix Spatial Blade, ArcSDE, и при этом поддерживается множеством геоинформационных продуктов. PostGIS предоставляет полный набор возможностей языка SQL совместно с геопространственными операторами, что позволяет решать большое количество пространственных задач посредством одних SQL-запросов, не используя сторонние инструменты.

Администрирование баз данных PostgreSQL на сервере осуществляется с помощью запросов на языке SQL либо посредством Менеджера баз данных QGIS, либо с помощью специализированного программного обеспечения, например, pgAdmin.

Структура базы данных PostgreSQL позволяет объединять логически связанные таблицы (слои PostGIS также являются таблицами) в схемы (Schemas). При этом для таблиц, находящихся в разных схемах, не накладывается никаких ограничений при построении запросов. В разных схемах могут находиться таблицы с одина-

---

[1]Почему нам стоит отказаться от шейп-файла? [Электронный ресурс] // Картетика. URL: https://cartetika.ru/tpost/3d9yhuz6h1-pochemu-nam-stoit-otkazatsya-ot-sheip-fa.

[2] Особенности геообработки с выходными данными в формате шейп-файла [Электронный ресурс] // ArcGIS for Desctop. URL: https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/supplement/geoprocessing-considerations-for-shapefile-output.htm#GUID-E16A9676-896B-4557-8BC2-796E2FA8D895.

[3] См. сноску 1.

[4] Место PostGIS/PostgreSQL среди СУБД с поддержкой пространственных данных [Электронный ресурс] // GIS-lab. URL: https://wiki.gis-lab.info/w/%D0%9C%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BE_PostGIS/PostgreSQL_%D1%81%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B8_%D0%A1%D0%A3%D0%91%D0%94_%D1%81_%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B6%D0%BA%D0%BE%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85_%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85.

ковыми именами. Доступ к конкретной таблице на языке SQL осуществляется с помощью следующего синтаксиса: ***схема.таблица.*** База данных PostGIS может также хранить и стили отображения содержащихся в ней слоев.

Для чтения хранящихся на сервере данных и передачи их клиентам необходимо серверное программное обеспечение. В общем случае для обмена информацией по протоколу HTTP используется HTTP-сервер, например, Apache или Nginx. В случае с ГИС дополнительно используют GeoServer – программное обеспечение для публикации и администрирования геоданных на сервере. GeoServer позволяет размещать данные в различных форматах, как в векторном, так и в растровом, как в виде отдельных файлов (шейп-файл или geotiff), так и в базах данных geopackage, PostGIS, ArcSDE и др.[5].

Данные в GeoServer структурируются по следующей схеме: Рабочие области – Хранилища (в зависимости от типа источника данных) – Группы слоев (в зависимости от тематики) – Слои.

При подключении к GeoServer базы данных PostGIS одному хранилищу соответствует одна схема. Хранилища могут включать слои или группы слоев. Группы слоев удобны для построения целостных карт, но могут передаваться на сторону клиента только в неразрывном виде по стандарту WMS (подробнее о нем будет сказано ниже).

В качестве формата хранения стилей отображения используется SLD (Styled Layer Descriptor). Чтобы применять стили к слоям в Geoserver, сначала необходимо создать набор стилей, загружая их из SLD-файлов. Данный формат основан на XML-структуре и является стандартным для многих геоинформационных систем. Однако возможности QGIS по настройке стилей отображения поддерживаются не полностью. В частности, не поддерживается генератор геометрии (Geometry Generator).

В геоинформатике в настоящее время используются такие основные стандарты передачи географической информации от сервера к клиенту, как WMS и WFS, реже – WCS и WPS.

Стандарт WMS (Web Map Service) передает векторную информацию, сгенерированную в растровый вид. Такой формат быстрее обрабатывается на стороне клиента, но при этом клиент не имеет возможности настроить индивидуальный стиль отображения или выполнить выборку объектов. При этом атрибутивные запросы поддерживаются. Взаимодействие клиентов с сервисами WMS осуществляется через запросы, которые составляются путем добавления параметров к URL сервиса в формате ***?ключ1=значение1&ключ2=значение2&...***. Базовые запросы стандарта WMS:

– GetCapabilities – запрос метаданных о сервисе. Обычно используется при первом подключении, чтобы получить сведения о доступных данных;
– GetMap – запрос изображения карты;
– GetFeatureInfo [необязательный параметр] – запрос информации об объектах карты;
– GetStyles – запрос стилей;
– GetLegendGraphic – запрос символов легенды[6].

Стандарт WFS (Web Feature Service) дает больше преимуществ, присущих векторным форматам. Он отдает клиенту данные в оригинальном виде, а клиент имеет возможность выполнить индивидуальную настройку стиля отображения, произвести выборку данных, а также их редактирование. WFS не передает стиль отображения объектов, его необходимо настраивать на стороне клиента. При этом следует учитывать, что обработка данных WFS на клиенте алгоритмически сложнее и требует больше вычислительных мощностей. WFS имеет следующие запросы:

– GetCapabilities – запрос сведений о содержащихся в сервисе данных;
– DescribeFeatureType – возвращает список доступных слоёв или описание атрибутов, если в запросе передано имя конкретного слоя;
– GetFeature – служит для запроса непосредственно самих данных;
– GetGMLObject – извлекает объекты и элементы по идентификатору;
– Transaction – обновляет существующие объекты путем добавления, обновления, удаления;
– LockFeature – защищает объекты от случайного редактирования[7].

Стандарт WCS (Web Coverage Service) предназначен для передачи растровой информации, а WPS (Web Processing Service) описывает правила для сервисов геообработки.

Для отображения слоев проекта в веб-среде используются картографические библиотеки языка программирования javascript. Среди библиотек с открытым исходным кодом наиболее часто используются OpenLayers и LeafLet. Библиотека Leaflet более компактна и проста в использовании. В сыром виде поддерживает только WMS, для поддержки WFS используется отдельный плагин.

Рассмотрев технологии построения клиент-серверных ГИС-проектов, остановимся подробнее на решениях, которые применены при разработке ГИС-проекта «Геодинамика и техногенез Беларуси».

---

[5] Geoserver Documentation [Electronic resourse]. URL: https://docs.geoserver.org/.

[6] Сервисы WMS [Электронный ресурс] // ArcGIS Enterprise. URL: https://enterprise.arcgis.com/ru/server/latest/publish-services/windows/wms-services.htm.

[7] Знакомство с Web Feature Service [Электронный ресурс] // GIS-lab. URL: https://gis-lab.info/qa/wfs-begin.html.

Учитывая вышерассмотренные преимущества, для размещения ГИС-проекта «Геодинамика и техногенез Беларуси» на сервере выбрана СУБД PostgreSQL с расширением PostGIS. Тематическим разделам проекта соответствуют схемы базы данных. Составные слои на уровне базы данных не выделяются. Загрузка данных в базу осуществляется через Менеджер базы данных QGIS с помощью команды Импорт слоя/файла.

База данных PostGIS подключена к GeoServer. Хранилища соответствуют тематическим разделам. Поскольку при передаче информации по стандарту WMS пользователь получает только готовую карту и теряет возможность перекомбинировать слои, настраивать их стили отображения, выбор в нашем проекте сделан в пользу стандарта WFS. Группировка слоев в составные слои производится непосредственно в клиентском веб-приложении. Редактирование данных в базе PostGIS осуществляется путем прямого доступа к базе данных в ПО QGIS.

Схема организации клиент-серверного ГИС-проекта «Геодинамика и техногенез Беларуси» показана на рисунке 3.

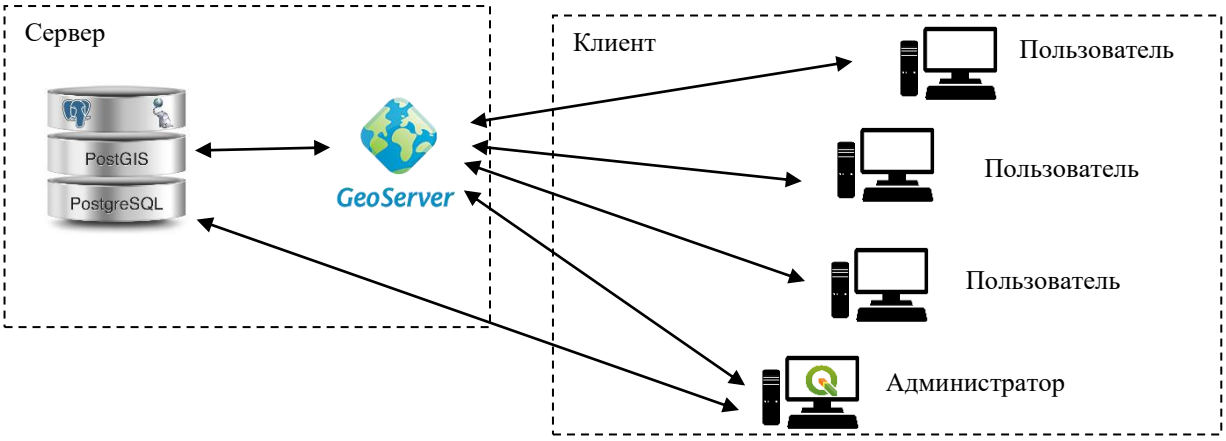


Рисунок 3. – схема организации ГИС-проекта «Геодинамика и техногенез Беларуси»

На рисунке 4 приведен пример отображения деформационной карты, построенной с помощью GeoServer в веб-среде.

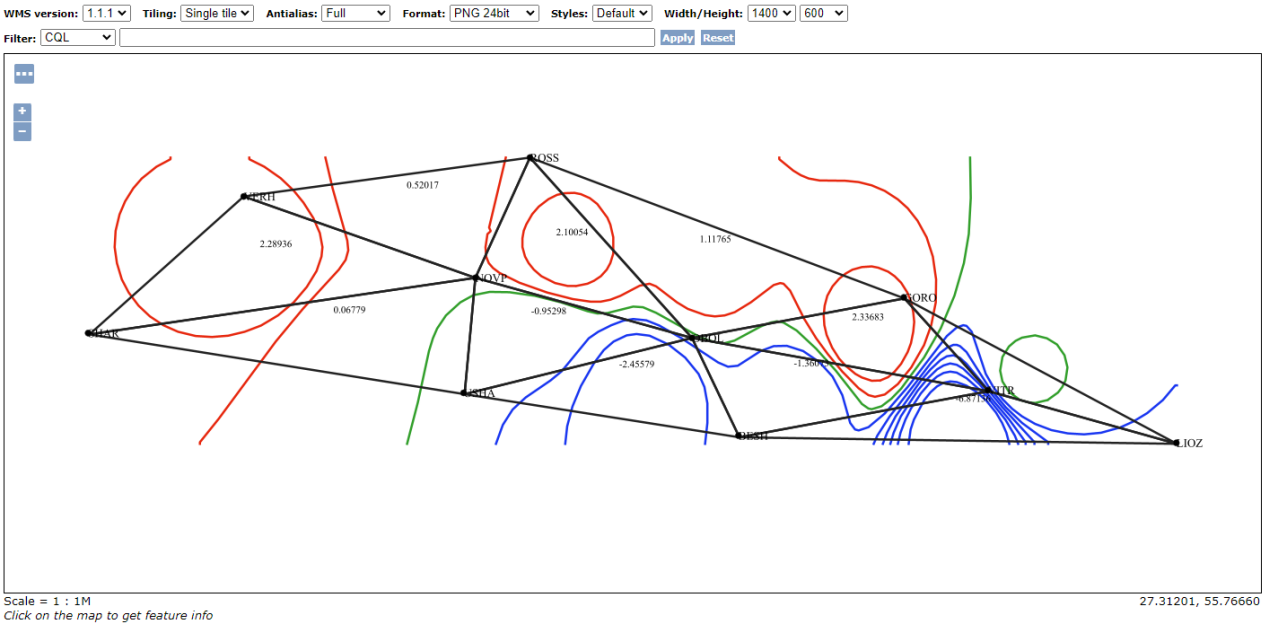


Рисунок 4. – деформационная карта в веб-среде

Заключение. ГИС-проект «Геодинамика и техногенез Беларуси» имеет широкий пространственный и тематический охват, в связи с чем актуален вопрос структурирования данных. Дальнейшее развитие проекта предполагает переход от настольной к клиент-серверной форме, а значит, структура должна быть согласована на разных уровнях: на уровне базы данных, на уровне сервера и на уровне клиента. В статье рассмотрены основные программные особенности реализации ГИС-проекта, обозначена проблематика структурирования данных, сформулировано предложение по реализации структуры клиент-серверного ГИС-проекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгий П.С. ГИС-проект «Геодинамика Беларуси» // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F. Стр-во. Прикладные науки. – 2020. – № 16. – С. 8–15.
2. Махнач А.С., Гарецкий Р.Г., Матвеев А.В. Геология Беларуси. – Минск: Ин-т геологических наук НАН Беларуси, 2001. – 815 с.

REFERENCES

1. Dolgii, P.S. (2020). GIS-proekt «Geodinamika Belarusi» [GIS-project “Geodynamics in Belarus”]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F. Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences], (16),* 8–15. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Makhnach, A.S., Garetskii, R.G. & Matveev, A.V. (2001). *Geologiya Belarusi*. Minsk: In-t geologicheskikh nauk NAN Belarusi. (In Russ.).

Поступила 17.05.2023

SOFTWARE FEATURES OF THE GIS-PROJECT "GEODYNAMICS AND TECHNOGENESIS IN BELARUS" DEVELOPMENT

P. DOLHI
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article discusses the problematic aspects of data structuring of the GIS project "Geodynamics and technogenesis in Belarus", developed by the author earlier, in case of the transition from desktop to client-server form. The current state of the project is reflected, its structure is given. The algorithm of zoning of territories according to the complex indicator of geological hazard, which is implemented in the project in the form of a module, is described. The weaknesses of the desktop form of a GIS project with data stored in shapefiles are revealed. The technologies of data storage, their processing on the server, provision to users are considered and their advantages and disadvantages are reviewed separately. Using the example of a composite layer of deformations, a fragment of the implementation of a web application based on GeoServer and OpenLayers is shown. Proposals are being made to implement the structure of a client-server GIS project. The article may be useful for students and specialists studying technologies for developing web-oriented GIS projects.

Keywords*: GIS project, data structuring, server, client, database, PostGIS, GeoServer.*

УДК 528.48 **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-82-89**

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПОЛУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ДЛЯ ФАСАДНОЙ СЪЕМКИ

канд. техн. наук К.И. МАРКОВИЧ,
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ,
канд. техн. наук, доц. А.М. ДЕГТЯРЕВ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

При строительстве новых, реконструкции эксплуатируемых зданий и сооружений часто возникает необходимость в оценке геометрии стен фасадов. Выбор методов исполнительной съемки фасадов обычно определяется в зависимости от геометрических параметров здания, конструктивных элементов, подлежащих исполнительной съемке, необходимой точности и др. Однако при любом методе съемки для составления необходимой отчетной документации возникает вопрос определения плоскости, на которую будут проектироваться конструктивные элементы фасада. В статье рассмотрены варианты получения оптимальной плоскости при производстве фасадной съемки. Усовершенствован алгоритм Гандера аппроксимации плоскости по общему уравнению. Предложен алгоритм, позволяющий упростить процесс получения оптимальной плоскости для фасадной съемки. Результаты получены на реальных измерениях координат точек фасада здания.

Ключевые слова: *съемка фасада, оптимальная плоскость, направляющие косинусы, длина нормали, метод наименьших квадратов, сингулярное разложение, определитель матрицы.*

Введение. Геодезическая съемка фасада является высокоточной исполнительной съемкой вертикальных и наклонных поверхностей зданий, основной целью которой является получение данных о координатах, размерах и высотах различных частей сооружения. Результатом геодезической съемки является модель здания, необходимая для выполнения проектных работ. При внешней отделке зданий часто применяют вентилируемые фасады, которые считаются эффективной системой, обеспечивающей тепловую и акустическую изоляцию, устраняющую тепловые мосты и проблемы конденсации. Основными функциями вентилируемого фасада являются не только утепление и защита стен от внешних атмосферных разрушающих воздействий на фасад, но и нивелирование значительных неровностей стен, исправление геометрии здания.

Проекты вентилируемых фасадов часто имеют достаточно сложные архитектурные решения. Однако даже легкий проект с несложной архитектурой требует высокой точности разбивочных работ для устройства конструктивных элементов вентилируемого фасада.

Зачастую заказчики пренебрегают потребностью в фасадных съемках и проекты КМД (конструкции металлические деталировочные) для устройства вентилируемого фасада разрабатываются проектными организациями на основе чертежей АР (архитектурное решение) без учета реальной геометрии здания и определения плоскостности и вертикальности стен фасада, на которые будет монтироваться металлический каркас вентилируемого фасада. Типовой металлический каркас состоит из специальных кронштейнов и закрепленной к ним системы из вертикальных и горизонтальных направляющих, на которые осуществляется монтаж фасадных панелей определенного типа. Если на этапе проектирования по чертежам АР сверялись лишь основные архитектурные элементы и общие габариты здания (длины фасадных стен), то в дальнейшем из-за неучтенных отклонений плоскостности и вертикальности стен при устройстве каркаса вентилируемого фасада может оказаться, что для выравнивания плоскости монтируемой системы до требуемых допусков, которые регламентированы в проектной документации и в нормативных документах для данного вида работ, могут понадобиться дополнительные материалы, что в свою очередь может серьезно отразиться на повышении сметной стоимости работ.

Кроме плоскостности и вертикальности на таких съемках могут быть указаны все контура здания на определенных уровнях, показаны отметки оконных и дверных проемов, что позволит проектировщикам учесть эти отклонения при определении сметной стоимости работ в процессе калькуляции объемов облицовочных материалов, подобрать наиболее выгодную схему отделки, чтобы во время монтажа на определенном участке можно было крепить определенные элементы без необходимости их подрезки.

Основная часть. Выбор самого метода съемки зависит от загруженности архитектурными элементами, требований заказчика и финансовых возможностей. Лазерное сканирование зданий является дорогой услугой, но оно помогает сэкономить много времени и получить точный результат. Целесообразно применение сканирования для съемки фасадов многоэтажных зданий и зданий повышенной этажности, а также зданий с большим количеством архитектурных элементов. Тахеометрическая съемка – более дешевый метод, подходящий для типовых сооружений, зданий небольшой этажности и простой архитектуры.

Точность производства съемки фасада и работ по устройству вентилируемого фасада регламентируется ТКП 45-3.02-114-2009[1]. В таблице 1 приведены допустимые отклонения для устройства вентилируемых фасадов из ТКП 45-3.02-114-2009.

Таблица 1. – Допустимые отклонения конструкции вентилируемого фасада

Наименование элемента и его параметров	Значение
Отклонение направляющей вентилируемого фасада от вертикальности стены, мм, не более	3
Отклонение от соосности смежных (по высоте) направляющих, мм, не более	5
Отклонение облицовки от вертикальности, мм, не более	2 на 1 м длины
Отклонение облицовки от плоскостности, мм, не более	5 на 1 м длины
Уступ между смежными по высоте направляющими, мм, не более	4

Из таблицы 1 следует, что основные требования предъявляются к взаимному расположению направляющих и взаимному расположению облицовки по каркасу в рамках вертикальности и плоскостности стены.

Съемочные материалы могут быть представлены как в виде разверток фасадных стен на цифровых и бумажных носителях, так и в виде цифровой 3D-модели. По такой модели, состоящей из облака точек, проектировщик может получить нужные ему данные на определенные участки фасада.

Чтобы составить чертеж фасада, нужно «спроектировать» точки на какую-то плоскость. В таком случае встает вопрос: каким образом задать плоскость? Рассмотрим самые распространенные варианты задания плоскости.

Для фасада здания (рисунок 1) существуют следующие варианты задания плоскости:

– вертикальная плоскость, проходящая через точки 1, 2;
– вертикальная плоскость, проходящая через точки 3, 4;
– вертикальная плоскость, перпендикулярная другому фасаду (или под каким-то углом), проходящая через одну из точек;
– плоскость, проходящая через любые три точки (но она не всегда будет вертикальной);
– другие варианты.

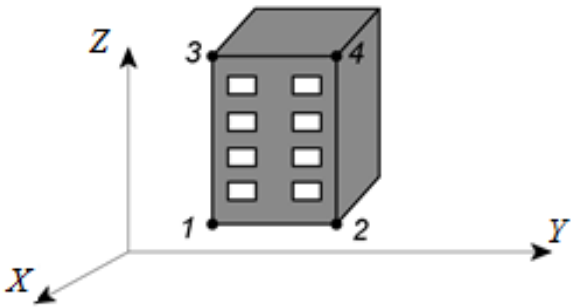


Рисунок 1. – Варианты задания исходной проектной плоскости

При съемке фасада в условной системе координат чаще выбирают 1-й вариант, так как фасадная часть здания, расположенная ближе к цоколю, как правило, наиболее прямолинейна, а по мере увеличения высоты строительства каркаса задания отклонения от проектных осей возрастают. Первый вариант задания плоскости удобен при камеральной обработке данных, так как, определяя координаты точки стояния тахеометра с базиса на фасаде, можно выявлять отклонения от заданной таким образом плоскости непосредственно во время производства полевых работ и указывать их на схеме.

Параметры выбора плоскости определяет проектная организация с учетом конструктивных особенностей проекта вентилируемых фасадов.

В результате полевых наблюдений фасада здания получают набор координат X_i, Y_i, Z_i, по которым необходимо вычислить положение оптимальной плоскости и отклонения реального фасада от оптимальной плоскости. Под оптимальной плоскостью будем понимать плоскость, полученную по общему уравнению плоскости, так как она производит коррекцию всех трех координат, полученных в результате съемки. Для определения параметров плоскости используем данные, приведенные в таблице 2.

[1] ТКП 45-3.02-114-2009 «Тепловая изоляция наружных ограждающих конструкций зданий и сооружений. Правила устройства». – Минск: Минстройархитектуры, 2009.

Таблица 2. – Исходные координаты точек фасадной съемки

№ точки	*X*, м	*Y*, м	*Z*, м
1	10,000	50,000	4,156
2	9,919	49,882	16,052
3	10,158	50,166	14,226
4	14,044	54,455	14,234
5	14,363	54,757	4,276
6	14,459	54,778	16,071
7	18,073	58,743	4,614
8	18,060	58,767	17,400
9	18,301	59,020	14,271
10	22,311	63,380	14,289
11	22,448	63,654	17,570
12	22,515	63,660	4,566
13	26,203	67,656	4,103
14	26,199	67,757	16,060
15	26,501	67,963	14,221
16	30,405	72,214	14,210
17	30,521	72,273	16,082
18	30,558	72,391	3,821

Для нахождения коэффициентов уравнения плоскости при фасадной съемке получим три модели, используя явные уравнения. Модель № 1: $z = f(x, y)$

$$z = a_1 \cdot x + b_1 \cdot y + c_1 \to z = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} \to z = A_1 \cdot k_1 . \quad (1)$$

Так как система (1) переопределённая, решение для коэффициентов найдем по методу наименьших квадратов [1]. Тогда, используя натуральные величины, для вектора коэффициентов k_1 будем иметь (2)

$$k_1 = \left(A_1^T \cdot A_1\right)^{-1} \cdot A_1^T \cdot z = N_1^{-1} \cdot b_1 . \quad (2)$$

Для целей выбора наиболее адекватной модели плоскости[2] получим определитель d_1 матрицы N_1 системы нормальных уравнений для модели (1).

С целью более полного представления и анализа модели получим направляющие косинусы n нормали к плоскости из центра системы координат и саму величину нормали p. Направляющие косинусы и длину нормали $(n, p)_1$ для модели (1) получают путем нормировки дополненного коэффициента –1 вектора k_1' коэффициентов k_1 из (2):

$$k_1' = \left[k(1)\ k(2)\ \ -1\ k(3)\right];$$

$$k_1'' = \left[k(1)\ k(2)\ \ -1\right];$$

$$(n,\ p)_1 = \frac{k_1'}{\sqrt{k_1'' \cdot k_1''^T}} . \quad (3)$$

Для удобства анализа результаты вычислений приведены в таблице 3.

Модель № 2 в натуральных величинах на основе явного уравнения плоскости $y = f(x, z)$ будет иметь следующий вид:

$$y = a_2 \cdot x + b_2 \cdot z + c_2 \to y = \begin{bmatrix} x_1 & z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & z_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{bmatrix} \to y = A_2 \cdot k_2 , \quad (4)$$

её решение по методу наименьших квадратов из (2)

$$k_2 = \left(A_2^T \cdot A_2\right)^{-1} \cdot A_2^T \cdot y = N_2^{-1} \cdot b_2 . \quad (5)$$

[2] URL: http://www.ilikebigbits.com/2015_03_04_plane_from_points.html.

Направляющие косинусы n_2 и длина нормали p_2 вычисляются на основе (3). Результаты вычислений также приведены в таблице 3.

Модель № 3 на основе явного уравнения плоскости $x = f(y, z)$ будет иметь вид (6)

$$x = a_3 \cdot y + b_3 \cdot z + c_3 \rightarrow x = \begin{bmatrix} y_1 & z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_n & z_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_3 \\ b_3 \\ c_3 \end{bmatrix} \rightarrow x = A_3 \cdot k_3 , \tag{6}$$

её решение по методу наименьших квадратов из (2)

$$k_3 = \left(A_3^T \cdot A_3\right)^{-1} \cdot A_3^T \cdot x = N_3^{-1} \cdot b_3 . \tag{7}$$

Определитель d_3 матрицы N_2, направляющие косинусы n_3 и длину нормали p_3 получим из (3). Результаты вычислений также приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты вычислений

Параметры	Модель № 1	Модель № 2	Модель № 3
k(1)	-4,1799795	1,0898975	0,9174800
k(2)	3,8302835	0,0003151	-0,0002895
k(3)	-137,94696	39,088652	-35,862224
определитель d_1	665,41	8087387,45	9607210,71
n(1)	-0,72606629	-0,7368418	-0,7368555
n(2)	0,66532378	0,6760652	0,6760502
n(3)	-0,17370092	-0,0002131	-0,0002133
p	-23,961513	26,426477	-26,425278

В качестве наиболее целесообразной плоскости имеет смысл выбрать ту, у которой определитель наибольший. Для нашего случая это модель № 3.

Отношение определителей для решения в центрированных величинах и в натуральных сохраняется. Решение для перестановочных моделей в центрированных и натуральных величин имеет различие порядка 10^{-8}.

Если модели № 1, 2, 3 разрешать в центрированных величинах, то результат получим совершенно идентичный, но только в том случае, когда значения координат меньше половины разрядной сетки используемых вычислительных средств. В противном случае, из-за сильной разномасштабности коэффициентов наклона и сдвига получаем неустойчивое решение и лучше выполнить центрировку.

В явных моделях № 1, 2, 3 подразумевается, что исправлению подлежит только одна координата из трех, т.е. только она имеет стохастические свойства. В реальности все три координаты имеют ошибки определения и все три должны быть откорректированы за счёт введения соответствующих поправок. Решение такого рода задачи будем считать оптимальным. Задачу в такой постановке можно решить, используя общую модель плоскости (8)

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0 \tag{8}$$

при условии $A^2 + B^2 + C^2 = 1$. В этом случае модель будет иметь вид (9)

$$a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z + d = 0 , \tag{9}$$

где коэффициенты модели [*a b c*] будут по своей сути направляющими косинусами *n* для плоскости;

d – величина нормали от плоскости до центра системы координат.

Задачу предлагается решить на основе минимизации длины вектора отклонения *r* реальных координат (10), полученных в результате съемки, от модельных координат по нормали к плоскости методом Гандера [2; 3].

$$a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z + d = r . \tag{10}$$

В основе метода два положения: редукция системы за счёт устранения с учётом влияния коэффициента *d* и применение к полученной системе сингулярного разложения, позволяющего получить вектор направляющих косинусов [*a b c*], минимизирующих квадрат длины $r^{\mathrm{T}} \cdot r$ вектора отклонений *r* из (10).

Для реализации алгоритма Гандера модель (10) запишем в матричном виде как (11)

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} \tag{11}$$

или как (12)

$$A \cdot k = r\,. \tag{12}$$

Далее матрица разлагается на основе QR-разложения $A = Q \cdot R$ и из матрицы R выделяется редуцированная треугольная матрица R_r размера 3×3 без первой строки и первого столбца. Таким образом, производится учёт и редукция системы по коэффициенту d:

$$R = \begin{pmatrix} -4,24264068711929 & -86,0402817302583 & -259,629811061827 & -49,5498005848661 \\ 0 & 29,5406609908746 & 32,1962435424337 & -0,158616999174367 \\ 0 & 0 & -0,20581971795562 & -0,788347865793772 \\ 0 & 0 & 0 & -22,6769889599583 \end{pmatrix};$$

$$R_r = \begin{pmatrix} 29,5406609908746 & 32,1962435424337 & -0,158616999174367 \\ 0 & -0,20581971795562 & -0,788347865793772 \\ 0 & 0 & -22,6769889599583 \end{pmatrix}.$$

Для редуцированной матрицы R_r выполняем сингулярное разложение (13)

$$R_r = U \cdot S \cdot V. \tag{13}$$

Последний столбец матрицы V является вектором направляющих косинусов n в решении нормализованной модели плоскости (10)

$$n = \begin{pmatrix} 0,7368492 \\ -0,6760570 \\ 0,002132 \end{pmatrix}.$$

Величину нормали к поверхности d получим из первого уравнения QR-разложения, т.е. по удалённой ранее строке

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix} = 0\,; \tag{14}$$

как

$$d = -\begin{bmatrix} R_{12} & R_{13} & R_{14} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \Big/ R_{11}\,. \tag{15}$$

В результате вычислений получили d = 26,4258259.

Вектор отклонений r от проектной плоскости получим из (12). Зная вектор отклонений r и решение $k = (p\ n)$ модели (12), получим величины коррекции $(r_{xyн})_i = (r_x, r_y, r_z)_i$ в координаты $(X, Y, Z)_i$, полученные по результатам съемки, которые будут принадлежать оптимальной проектной плоскости вида (16)

$$(r_{xyz})_i = r_i \cdot n\,. \tag{16}$$

Результаты вычислений r_i приведены в таблице 4. Тогда координаты точки, принадлежащие оптимальной плоскости, будут

$$(xyz)'_i = (xyz)_i - (r_{xyz})_i\,. \tag{17}$$

Если координаты точек съемки представлены построчно в матрице размера ($t \times 3$), для получения всех значений координат спроектированных на плоскость точек сразу можно использовать следующую формулу (18):

$$(xyz)' = (xyz) \; - r \otimes n^T \,, \tag{18}$$

где n строка направляющих косинусов из решения модели (14);

r – вектор-столбец остатков;

$\otimes$ – символ произведения Кронекера.

Используя формулу (17) для координат, приведенных в таблице 2, получим значения координат, которые будут принадлежать оптимальной плоскости. Результаты вычислений приведены в таблице 4, а графическая интерпретация вычислительной операции – на рисунке 2.

Таблица 4. – Величины нормалей *r* и приведённые к оптимальной плоскости координаты точек *X, Y, Z*.

№	*r*, м	*X*, м	*Y*, м	*Z*, м
1	-0,0076	10,006	49,995	4,156
2	0,0150	9,908	49,892	16,052
3	-0,0013	10,159	50,165	14,226
4	-0,0375	14,072	54,430	14,234
5	-0,0088	14,369	54,751	4,276
6	0,0503	14,422	54,812	16,071
7	0,0303	18,051	58,763	4,614
8	0,0072	18,055	58,772	17,400
9	0,0131	18,291	59,029	14,271
10	0,0202	22,296	63,394	14,289
11	-0,0634	22,495	63,611	17,570
12	-0,0208	22,530	63,646	4,566
13	-0,0050	26,207	67,653	4,103
14	-0,0736	26,253	67,707	16,060
15	0,0092	26,494	67,969	14,221
16	0,0120	30,396	72,222	14,210
17	0,0580	30,478	72,312	16,082
18	0,0028	30,556	72,393	3,821

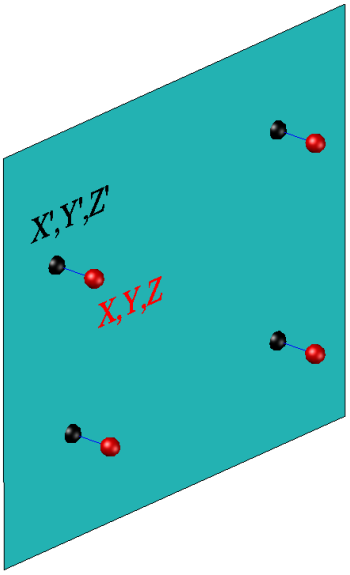


Рисунок 2. – Графическая интерпретация вычислительной операции

Если в алгоритме Гандера QR-разложение для редукции сдвига плоскости заменить процессом центрирования исходных координат, то получим более удобный и простой алгоритм вычислений. Здесь на первом этапе центрируются координаты, на втором этапе к полученной центрированной системе применяется сингулярное разложение с получением направляющих косинусов, и на третьем этапе путем подстановки направляющих косинусов в общее уравнение модели получим, если необходимо, величину сдвига *d*. Результаты совершенно идентичны в сравнении с применением алгоритма Гандера.

Таким образом, вычислив координаты проекций точек на плоскость, далее возможно выполнять вычисления необходимых фактических размеров для целей проектирования. Вычисленные значения r_i характеризуют отклонение реального положения поверхности фасада здания от оптимальной плоскости.

Для случая, когда необходимо получить вертикальную оптимальную плоскость, данные представим в виде модели № 4 (19)

$$y = a_4 \cdot x + b_4 \rightarrow y = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ \cdots & \cdots \\ x_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_4 \\ b_4 \end{bmatrix} \rightarrow y = A_4 \cdot k_4 \tag{19}$$

Решение модели № 4 в натуральных величинах по методу наименьших квадратов дает значения, приведенные в таблице 5.

Решение модели № 2 и решение модели № 4 отличаются в 6-ом знаке для коэффициента наклона и во 2-ом знаке для коэффициента сдвига.

Решим модель № 4 путем минимизации квадрата отклонения *r* от модельной линии $a \cdot x + b \cdot y + c = r$, при условии $a^2 + b^2 = 1$ (модель № 5). Тогда коэффициенты модели будут по сути направляющими косинусами линии *n* = [*a b*], а *c* – величина нормали от линии до центра системы координат. Из алгоритма Гандера получим значения, приведенные в таблице 5 (модель 5)

Таблица 4. – Коэффициенты моделей № 4, 5, полученные по алгоритму Гандера

Параметры	Модель № 4	Модель № 5
k(1)	1,0898958	–
k(2)	39,0923668	–
определитель d_1	15707,71	–
n(1)	0,7368413	0,7368487
n(2)	-0,6760658	-0,6760576
p	26,4290113	26,4283613

Заключение. Анализ нормативной и технической литературы и рассмотренные алгоритмы получения оптимальной плоскости при производстве фасадной съемки позволяют сделать следующие выводы.

1. Достоверность результатов фасадной съемки зависит не только от точности измерений, но и от правильности интерпретации результатов измерений. Фасадная съемка является исходным материалом для проведения проектных работ и в конечном итоге определяет качество проекта.
2. Вычисленные параметры оптимальных плоскостей фасадов зданий позволяют получить представление о реальной форме всего сооружения в целом. В статье предлагается усовершенствованный алгоритм Гандера аппроксимации плоскости по общему уравнению. Предложен алгоритм, позволяющий упростить процесс получения оптимальной плоскости при фасадной съемке.
3. Применение вышеизложенных алгоритмов позволяет определить параметры как наклонной, так и вертикальной оптимальной плоскости для расчета отклонений строительных конструкций от плоскостности и в дальнейшем для создания проектных чертежей при ремонте, облицовке фасада или реконструкции здания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
2. Gander W., Gander J., Kwok F. An Scientific Computing – Introduction using Maple and MATLAB. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – 905 p.
3. Голуб Дж., Ван Лоан Ч. Матричные вычисления. – М.: Мир, 1993. – 548 с.

REFERENCES

1. Seber, Dzh. (1980). *Lineinyi regressionnyi analiz*. Moscow: Mir. (In Russ.).
2. Gander, W., Gander, J. & Kwok, F. (2014). *An Scientific Computing – Introduction using Maple and MATLAB*. Switzerland: Springer International Publishing.
3. Golub, Dzh. & Van Loan, Ch. (1993). *Matrichnye vychisleniya*. Moscow: Mir. (In Russ.).

Поступила 07.04.2023

IMPROVEMENT OF THE ALGORITHM FOR OBTAINING THE OPTIMAL PLANE FOR FACADE SURVEY

K. MARKOVICH, V. YALTYKHOV, A. DEGTJAREV
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

During the construction of new, reconstruction of buildings and structures in operation, it often becomes necessary to assess the geometry of the walls of the facades. The choice of methods for the executive survey of facades is usually determined depending on the geometric parameters of the building, the structural elements to be surveyed, the required accuracy. With any survey method for compiling the necessary reporting documentation, the question arises of determining the plane on which the structural elements of the facade will be designed. The article considers options for obtaining the optimal plane in the production of facade survey. The algorithm for approximating the plane by the general equation has been improved. An algorithm is proposed that simplifies the process of obtaining the optimal plane for facade survey. The results were obtained on real measurements of the coordinates of the points of the facade of the building.

Keywords: *facade survey, optimal plane, direction cosines, normal length, least squares method, singular value decomposition, matrix determinant.*

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 628.544 **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-90-93**

КОРРОЗИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ В ДЕЗИНФИЦИРУЮЩИХ РАСТВОРАХ

А.В. ПОСПЕЛОВ[1], канд. хим. наук, доц. И.В. МАЦУКЕВИЧ[2], канд. хим. наук А.А. КАСАЧ[3], М.А. КОМАРОВ[4], С.Н. РОЖКО[5]
([1], [3], [4]Белорусский государственный технологический университет, Минск, [2]ИОНХ НАН Беларуси, Минск, [5]ИЖХ НАН Беларуси, Минск)
[1]pospelov.ip@gmail.com, [2]irinavas.k1975@gmail.com, [3]kasach2018@bk.ru, [4]makkom1995@gmail.com, [5]svetlana89rozhko@gmail.com

Дезинфекция поверхностей является актуальной мерой для инактивации микроорганизмов и вирусов. Данная процедура используется практически повсеместно, от сооружений водоподготовки до медицинских учреждений и общественных объектов. Недостатком этих мер является усиление коррозии контактных поверхностей, часто выполненных из нержавеющих сталей, сопровождающееся вымыванием тяжелых металлов из них. Согласно рекомендациям ВОЗ, наибольшее количество дезинфицирующих веществ представляет собой растворы гипохлоритов. В статье исследовано коррозионное воздействие дезинфицирующих веществ на нержавеющие стали трехсотой серии. Для исследований использовали хлорсодержащие растворы в концентрации 2 мас.% в пересчете на гипохлорит ион и насыщенную озоном воду в качестве альтернативного варианта дезинфицирующего раствора. Результаты исследований показали, что наибольшее коррозионное воздействие на исследуемые нержавеющие стали оказывают растворы гипохлорита натрия и гипохлорита кальция. При этом наибольшее вымывание металлов из исследуемых сталей происходит при использовании раствора гипохлорита кальция. Использование насыщенной озоном воды не приводит к вымыванию тяжелых металлов из всех исследуемых сталей.

Ключевые слова: *дезинфекция, нержавеющие стали, тяжелые металлы, коррозия.*

Введение. Дезинфекция поверхностей различных видов стали актуальна для пищевой промышленности, мест общественного питания, здравоохранения и др. В таких местах применяют растворы с высокими дозами активного хлора: 0,5–2 мас.% [1–3] и до 5 мас.%. В имеющейся литературе содержится относительно мало информации о коррозии стали и практически отсутствуют данные о вымывании металлов в зависимости от различных параметров дезинфекции и типа дезинфицирующего средства при обработке поверхностей.

В целях борьбы с эпидемиями вирусов, как, например, во время пандемии коронавируса, при которой хлорсодержащие дезинфицирующие средства являются наиболее широко используемыми в мире дезинфицирующими средствами и одними из многих рекомендуемых ВОЗ, происходит масштабная обработка поверхностей, а во многих случаях сопровождающаяся использованием растворов с высокими концентрациями хлорсодержащих дезинфицирующих веществ. Это приводит в первую очередь к высокой коррозии металлических поверхностей, вызывающей разрушение поверхности или конструкции, а также вымыванию тяжелых металлов в окружающую среду, что наиболее опасно в объектах питания и медицинских учреждениях.

Дезинфицирующие средства на основе хлора не являются единственной альтернативой [4–6]. Ранее было показано, что дезинфекция поверхностей растворенным в воде озоном может быть перспективной с точки зрения коррозии и с экологической точки зрения [7–10]. Дезинфекция поверхностей имеет жизненно важное значение для предотвращения переноса патогенных микроорганизмов [11], но полное понимание ее краткосрочных и долгосрочных эффектов важно для выбора оптимальных вариантов с экологической, экономической и социальной точки зрения[1] [12; 13].

В качестве целей данного исследования были выбраны:

– установить скорость электрохимической коррозии нержавеющих сталей 304, 316, 321 в хлорсодержащих средах и в растворенном в воде озоне;

– выяснить влияние процедур очистки на последующее высвобождение ионов тяжелых металлов и деградацию поверхности нержавеющих сталей;

– определить ускорение коррозионных процессов нержавеющих сталей после их дезинфекции в хлорсодержащих средах.

[1] Романовский В.И., Бессонова Ю.Н. Сравнительный анализ способов дезинфекции водозаборных скважин и сооружений водоснабжения // Перспективы развития и организационно-экономические проблемы управления производством: материалы междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск: Право и экономика, 2015. – Т. 1. – С. 211–226.

Методология исследований. Для исследований выбраны нержавеющие стали марок 304, 316 и 321. Также для исследования были взяты растворы гипохлорита натрия, гипохлорита кальция, хлорамина Б, хлорной извести и растворенного озона в воде. Исследуемая концентрация хлорсодержащих реагентов 2 мас.% активного хлора.

Количественный и качественный анализ миграции элементов из нержавеющих сталей проводили после 30 дней нахождения исследуемых сталей в исследуемых растворах дезинфицирующих веществ. Прибор Thermo Scientific iCAP 7200 ICP-OES использовался для анализа микроэлементов в жидкой фазе.

Электрохимические исследования проводили в стандартной трехэлектродной электрохимической ячейке на потенциостате/гальваностате Metrohm Autolab PGSTAT 302N. В рамках электрохимических исследований измеряли потенциал открытого контура в течение 30 мин, а также выполняли последующие измерения потенциодинамическим методом со скоростью 1 мВ/с с –200 до +1200 мВ.

Основная часть. Потенциал открытого контура с течением времени измерялся в течение 30 минут для различных выбранных дезинфицирующих веществ (рисунок 1). Для всех исследуемых растворов потенциал открытого контура возрастал в течение времени 500 с. Эта тенденция в наибольшей степени наблюдалась для растворов гипохлорита натрия и кальция. Затем потенциал открытого контура стабилизировался на высоком уровне, проявляя активное коррозионное поведение в основном для растворов гипохлорита натрия и кальция. Установлено, что время стабилизации зависит от состава раствора и pH. Для хлорной извести потенциал открытого контура имеет самые низкие значения. Более высокие значения потенциала открытого контура наблюдались для растворов гипохлорита натрия и кальция. Органическое дезинфицирующее средство хлорамин Б, искусственная водопроводная вода и озонированная вода имеют близкие значения потенциала открытого контура и аналогичную тенденцию.

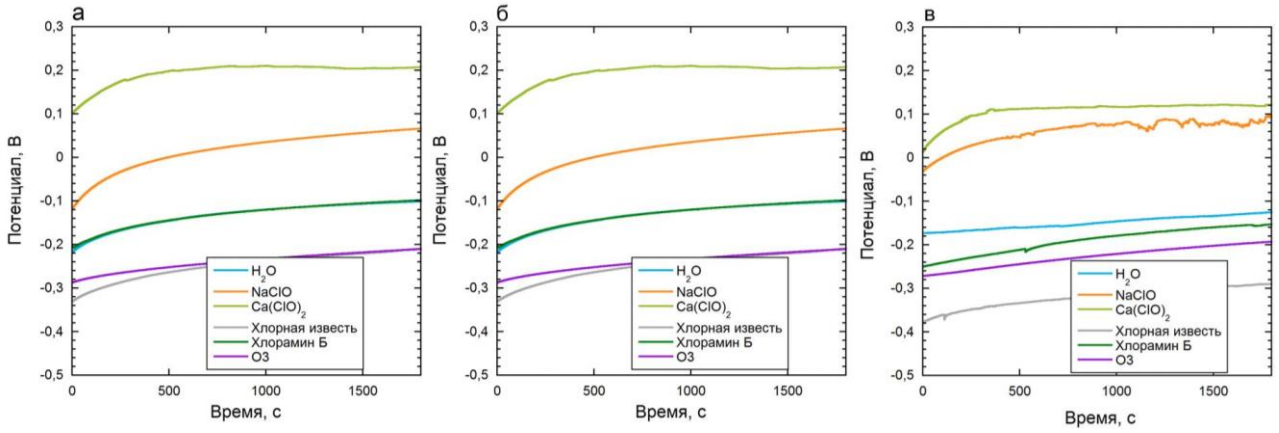


Рисунок 1. – Потенциал открытого контура для сталей 304 (*а*), 316 (*б*) и 321 (*в*) в исследуемых растворах

Измеренные значения потенциала образования питинга уменьшаются в ряду вода > вода насыщенная озоном > хлорамин Б > гипохлорит кальция > гипохлорит натрия > хлорная известь и составляют 1,37, 1,27, 1,09, 0,95, 0,87 и 0,58 соответственно. Полученные значения электрохимических измерений показывают, что наиболее коррозионно активными являются гипохлориты кальция и натрия.

Насыщенный раствор озона по измеренным электрохимическим показателям близок по значениям к питьевой воде, что объясняется образованием тонкой и плотной пленки продуктов коррозии на нержавеющих сталях, предотвращающих окисление стали.

Основными выщелоченными элементами из нержавеющих сталей были Fe>Cr>Ni>Mn>Mo с одинаковой тенденцией для всех хлорсодержащих растворов (рисунок 2). В воде и в растворенном в воде озоне все значения концентрации тяжелых металлов не превышают пределов обнаружения прибора. Суммарное выщелачивание элементов уменьшается в ряду сталей 304>316>321. Максимальное выщелачивание элементов наблюдалось для растворов $Ca(ClO)_2$. В растворах $Ca(ClO)_2$ общее выщелачивание металлов для 304 было в 4,1 раза выше по сравнению с 316 и в 4,9 раза выше по сравнению с 321. Максимальное выщелачивание молибдена наблюдалось для 316 в растворе $Ca(ClO)_2$. Для 304 стали использование NaClO привело к выщелачиванию в 2,2 раза меньшего количества ионов, чем при использовании хлорамина Б. Для стали 316 при использовании хлорамина Б выщелочилось в 2,5 раза больше элементов, чем при обработке NaClO. Для стали 321 использование хлорной извести, хлорамина и гипохлорита натрия дало практически одинаковые результаты. Для них полученные значения до 15 раз ниже, чем при обработке в растворе гипохлорита натрия. Наименьшее количество выщелоченных элементов было при использовании раствора хлорной извести для всех типов сталей.

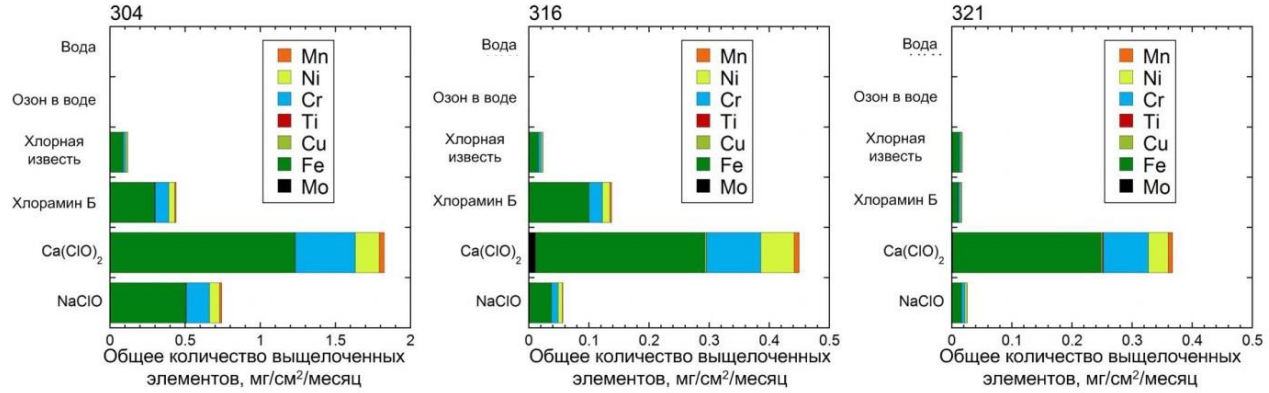


Рисунок 2. – Вымывание тяжелых металлов из исследуемых нержавеющих сталей

Полученные данные по шероховатости согласуются с результатами по вымыванию элементов. Наибольшие изменения в параметрах шероховатости заметны для стали 304. Значения параметра максимальная глубина впадины профиля самые высокие у раствора гипохлорита кальция.

Анализируя показатели шероховатости также становятся заметны различия при использовании воды и растворенного в воде озона. Наиболее существенны эти различия для стали 304. Значение средней шероховатости для стали 304 в растворенном в воде озоне более чем в 5 раз выше, чем в воде. Для сталей 316 и 321 изменения в параметрах шероховатости в растворенном в воде озоне несущественны, в сравнении с исходными значениями.

Выводы. В результате проведения исследований можно сделать выводы:

– при одинаковой концентрации активного хлора в исходном дезинфицирующем растворе наибольшее коррозионное воздействие на стали оказывают растворы гипохлорита натрия и гипохлорита кальция;

– насыщенный раствор озона по измеренным электрохимическим показателям близок по значениям к питьевой воде;

– наибольшее вымывание элементов и наибольшие показатели шероховатости вызывают растворы гипохлорита кальция;

– наиболее перспективным дезинфицирующим веществом является насыщенная озоном вода;

– использование насыщенной озоном воды не приводит к вымыванию элементов из нержавеющих сталей, определяемых оптико-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия», задания 2.1.02 «Сорбционные, каталитические и мембранные материалы для водоочистки и водоподготовки», НИР 5 «Физико-химические основы коррозии материалов в дезинфицирующих средах и разработка экологичных и высокоэффективных способов дезинфекции» (2021–2023 гг.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Efficacy of different concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine in disinfection of contaminated Resilon cones / V. Zand, A. Salem-Milani, S. Shahi et al. // Med Oral Patol Oral Cir Bucal. – 2012. – № 17(2). – P. 352.
2. The Disinfection Characteristics of Ebola Virus Outbreak Variants / B.W.M. Cook, T.A. Cutts, A.M. Nikiforuk et al. // Sci. Rep. – 2016. – № 6. – P. 38293.
3. Gallandat K., Wolfe M.K., Lantagne D. Surface cleaning and disinfection: Efficacy assessment of four chlorine types using Escherichia coli and the Ebola surrogate Phi6 // Environmental science & technology. – 2017. – № 51(8). – P. 4624–4631.
4. Романовский В.И., Жилинский В.В. Коррозионная устойчивость стали 15 к дезинфицирующим растворам // Тр. БГТУ. Сер. Химия и технология неорган. в-в. – 2015. – № 3(176). – С. 29–34.
5. Романовский В.И., Жилинский В.В., Бессонова Ю.Н. Сравнительный анализ коррозионной устойчивости углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам электрохимическим методом // Вестн. БрГТУ. Водохозяйств. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2016. – № 2(98). – С. 126–129.
6. Hurynovich A.D., Romanovski V.I., Wawrzeniuk P. Analiza efektywności kaskadowego generator ozonu // Economia i środowisko. – 2013. – № 1(44). – S. 156–164.
7. Определение основных параметров дезинфекции и обеззараживания озоном сооружений питьевого водоснабжения / В.И. Романовский, В.В. Лихавицкий, М.В. Рымовская и др. // Тр. БГТУ. Сер. Химия и технология неорган. в-в. – 2015. – № 3(176). – С. 108–112.
8. Романовский В.И., Гуринович А.Д., Вавженюк П. Эффективность использования озона в технологии водоподготовки // Водоочистка. – 2014. – № 2. – С. 66–70.
9. Анализ эффективности дезинфекции сооружений питьевого водоснабжения с использованием хлорсодержащих дезинфицирующих средств и озона / В.И. Романовский, М.В. Рымовская, Ю.Н. Бессонова и др. // Вестн. БрГТУ. Водохозяйств. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2015. – № 2(92). – С. 68–71.
10. Романовский В.И., Чайка Ю.Н. Коррозионная устойчивость углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам // Тр. БГТУ. Сер. Химия и технология неорган. в-в. – 2014. – № 3(167). – С. 47–50.
11. Shelf-Life of Chlorine Solutions Recommended in Ebola Virus Disease Response / Q. Iqbal, M. Lubeck-Schricker, E. Wells et al. // PLoS One. – 2016. – № 11(5). – P. 0156136.

12. Романовский В.И., Рымовская И.В., Янь Фэн С. Сравнительный анализ эффективности дезинфекции сооружений водоснабжения дезинфицирующими растворами // Вода magazine. – 2015. – № 10(98). – С. 18–21.
13. Гуринович А.Д., Романовский В.И., Бессонова Ю.Н. Эффективность дезинфекции озоном сооружений систем водоснабжения // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2016. – № 10. – С. 48–51.

REFERENCES

1. Zand, V., Salem-Milani, A., Shahi, S., Akhi, M.T. & Vazifekhah, S. (2012). Efficacy of different concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine in disinfection of contaminated Resilon cones. *Medicina oral, patologia oral y cirugia bucal, 17(2),* 352. DOI: 10.4317/medoral.17467.
2. Cook, B.W.M., Cutts, T.A., Nikiforuk, A.M., Leung, A., Kobasa, D. & Theriault, S.S. (2016). The Disinfection Characteristics of Ebola Virus Outbreak Variants. *Sci. Rep., (6),* 38293. DOI: 10.1038/srep38293.
3. Gallandat, K., Wolfe, M.K. & Lantagne, D. (2017). Surface cleaning and disinfection: Efficacy assessment of four chlorine types using Escherichia coli and the Ebola surrogate Phi6. *Environmental science & technology, 51(8),* 4624–4631. DOI: 10.1021/acs.est.6b06014.
4. Romanovskii, V.I. & Zhilinskii, V.V. (2015). Korrozionnaya ustoichivost' stali 15 k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of steel 15 to disinfectant solutions]. *Trudy BGTU. Ser. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Series Chemistry and technology of inorganic substances], 3(176),* 29–34. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Romanovskii, V.I., Zhilinskii, V.V. & Bessonova, Yu.N. (2016). Sravnitel'nyi analiz korrozionnoi ustoichivosti uglerodistykh stalei k dezinfitsiruyushchim rastvoram elektrokhimicheskim metodom [Comparative analysis of the corrosion resistance of carbon steels to disinfectant solutions by the electrochemical method]. *Vestnik BrGTU. Vodokhozyaistv. str-vo, teploenergetika i geoekologiya [Bulletin of BrGTU. Water management construction, heat and power engineering and geoecology], 2(98),* 126–129. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Hurynovich, A.D., Romanovski, V.I. & Wawrzeniuk, P. (2013). Analiza efektywności kaskadowego generator ozonu. *Economia i środowisko, 1(44),* 156–164. (In Polish).
7. Romanovskii, V.I., Likhavitskii, V.V., Ryimovskaya, M.V. & Gurinovich, A.D. (2015). Opredelenie osnovnykh parametrov dezinfektsii i obezzarazhivaniya ozonom sooruzhenii pit'evogo vodosnabzheniya [Determination of the main parameters of disinfection and disinfection by ozone of drinking water supply facilities]. *Tr. BGTU. Ser. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Series Chemistry and technology of inorganic substances], 3(176),* 108–112. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D. & Vavzhenyuk, P. (2014). Effektivnost' ispol'zovaniya ozona v tekhnologii vodopodgotovki [Efficiency of using ozone in water treatment technology]. *Vodoochistka [Water treatment], (2),* 66–70. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Romanovskii, V.I., Zhilinskii, V.V., Bessonova, Yu.N., Kovalevskaya, A.M. & Likhavitskii, V.V. (2015). Analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii pit'evogo vodosnabzheniya s ispol'zovaniem khlorsoderzhashchikh dezinfitsiru-yushchikh sredstv i ozona [Analysis of the effectiveness of disinfection of drinking water supply facilities using chlorine-containing disinfectants and ozone]. *Vestn. BrGTU. Vodokhozyaistv. str-vo, teploenergetika i geoekologiya [Bulletin of BrGTU. Water management construction, heat and power engineering and geoecology], 2(92),* 68–71. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Romanovskii, V.I. & Chaika, Yu.N. (2014). Korrozionnaya ustoichivost' uglerodistykh stalei k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of carbon steels to disinfectant solutions]. *Trudy BGTU. Ser. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Series Chemistry and technology of inorganic substances], 3(167),* 47–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Iqbal, Q., Lubeck-Schricker, M., Wells, E., Wolfe, M.K. & Lantagne, D. (2016). Shelf-Life of Chlorine Solutions Recommended in Ebola Virus Disease Response. *PLoS One, 11(5),* 0156136. DOI: 10.1371/journal.pone.0156136.
12. Romanovskii, V.I., Rymovskaya, I.V. & Yan' Fen, S. (2015). Sravnitel'nyi analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii vodosnabzheniya dezinfitsiruyushchimi rastvorami [Comparative analysis of the effectiveness of disinfection of water supply facilities with disinfectant solutions]. *Voda magazine [Water magazine], 10(98),* 18–21. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Gurinovich, A.D., Romanovskii, V.I. & Bessonova, Yu.N. (2016). Effektivnost' dezinfektsii ozonom sooruzhenii sistem vodosnabzheniya [Efficiency of ozone disinfection of water supply systems facilities]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie [Water treatment. Water treatment. Water supply], (10),* 48–51. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 24.04.2023

CORROSION OF STAINLESS STEELS IN DISINFECTANT SOLUTIONS

A. POSPELOV[1)], I. MATSUKEVICH[2)], A. KASACH[3)], M. KAMAROU[4)], S. ROZHKO[5)]
([1), 3), 4)]Belarusian State Technological University, Minsk,
[2)]IGIC NAS of Belarus, Minsk, [5)]IHCS NAS of Belarus, Minsk)

Surface disinfection is a relevant measure for the inactivation of microorganisms and viruses. This procedure is used almost everywhere, from water treatment facilities to medical institutions and public facilities. The disadvantage of these measures is the increased corrosion of the contact surfaces, often made of stainless steels and accompanied by the leaching of heavy metals from them. According to WHO recommendations, the largest amount of disinfectants is hypochlorite solutions. The article investigates the corrosive effect of disinfectants on stainless steels of the 300th series. For research, chlorine-containing solutions were used at a concentration of 2 wt.% in terms of hypochlorite ion and ozone-saturated water as an alternative disinfectant solution. The research results showed that solutions of sodium hypochlorite and calcium hypochlorite have the greatest corrosion effect on the studied stainless steels. In this case, the largest amount of leachable metals from the studied steels occurs when using a solution of calcium hypochlorite. The use of water saturated with ozone does not lead to the washing out of heavy metals from all the studied steels.

Keywords: *disinfection, stainless steels, heavy metals, corrosion.*

УДК 504.064:681.518:628.3 **DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-94-103**

ОБОСНОВАНИЕ И СХЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАНЖИРУЮЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕЖИМОВ ВОДООТВЕДЕНИЯ

д-р техн. наук, доц. В.Н. ШТЕПА[1)],
д-р физ.-мат. наук, доц. Н.Ю. ЗОЛОТЫХ[2)],
д-р техн. наук, проф. С.Ю. КИРЕЕВ[3)]
([1)]Полесский государственный университет, Пинск,
[2)]Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, [3)]Пензенский государственный университет)
[1)]shtepa.v@polessu.by, [2)]nikolai.zolotykh@itmm.unn.ru, [3)]dean_fptet@pnzgu.ru

Исходя из анализа экологических недостатков функционирования централизованных систем водоотведения обоснована технологическая целесообразность использования ранжирующих измерительных систем для импактного мониторинга с целью предотвращения негативного техногенного воздействия на геоэкосистемы. Разработаны и предложены структурные схемы практического внедрения таких решений. Созданы структурные модели использования интеллектуальных ранжирующих измерительных систем для прогнозирования экологического состояния систем водоотведения и водных объектов с уменьшением рисков возникновения чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: *водоотведение, водные объекты, экологическая эффективность, ранжирующие измерительные системы, интеллектуальный анализ данных, чрезвычайные ситуации.*

Введение. По оценкам ООН, к 2050 году в городах будет проживать около 60% всего населения планеты. Соответственно, растет городское население, а территория и количество ресурсов в городе в основном остаются прежними. Такая ситуация актуальна и для Республики Беларусь. Современные белорусские города сталкиваются среди прочих и со следующими вызовами: инфраструктурный разрыв и высокий уровень износа основных городских сетей; увеличение экологического давления на города [1].

При этом в водной стратегии Республики Беларусь на период до 2030 года в условиях изменения климата под водной безопасностью понимается, в том числе[1]: безопасное отведение сточных вод (СВ) при обеспечении финансовой доступности услуг водоотведения; безопасное отведение производственных сточных вод при обеспечении их нормативной очистки; защищенность жизни и имущества населения и отраслей экономики от негативного воздействия вод; обеспечение хорошего экологического состояния водных объектов.

В то же время существующие очистные сооружения (ОС) в городах и районных центрах страны построены преимущественно в 70-е годы прошлого века, имеют большой физический износ и не могут обеспечить выполнение современных требований к качеству очистки сточных вод, в первую очередь, по удалению биогенных элементов. В настоящее время необходимо проведение их комплексной реконструкции и модернизации. Ситуация усугубляется тем, что в планах на 2021–2025 годы было проведение реконструкции, модернизации и строительства 70 коммунальных очистных сооружений, 28 из них – на средства международных финансовых организаций, а такое финансирование на данный момент приостановлено и имеет неопределённые перспективы. Таким образом, необходимо значительно рациональней использовать доступный организационный и экономический ресурсы на основе усовершенствования теоретических подходов по управлению функционированием ОС, с противодействием возникновению чрезвычайных ситуаций (ЧС) на водных объектах, и созданию более адекватных технических заданий (ТЗ) проектирования самих очистных сооружений.

Соответственно, усовершенствование функционирования централизованных систем водоотведения (ЦСВ), включающих технологические комплексы очистки СВ, путём создания программно-аппаратных средств предупреждения возникновения чрезвычайных ситуаций на водных объектах на основе оперативного экологического мониторинга и математического прогнозирования влияния параметров сточных вод на работу очистных сооружений является актуальной научно-практической задачей.

Анализ существующих разработок в области экологического мониторинга, измерительных систем и обработки данных систем водоотведения. Классическая иерархическая система экологического мониторинга гарантирует автономию информационного обеспечения на каждом уровне организации (локальном, региональ-

[1] Станкевич А.П. Водная стратегия Республики Беларусь на период до 2030 года // Водные ресурсы и климат: материалы V Междунар. Вод. Форума, Минск, 5–6 окт. 2017 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: проф. д-р техн. наук. О.Б. Дормешкин и др. – Минск, 2017. – С. 26–27.

ном, глобальном). Она позволяет укрупнять, интегрировать, генерализовать информацию низших уровней при переходе на высшие согласно следующей структуре («сверху-вниз») [2]:

- фоновый мониторинг (ФМ);
- региональный мониторинг (РМ);
- импактный мониторинг (ИМ).

Теоретический базис ИМ как раз и целесообразно использовать при создании распределённых систем оперативного сбора информации о параметрах (состав, расход, температура) сточных вод, поступающих, транспортирующихся и очищающихся в ЦСВ, поскольку элементы схемы импактного мониторинга должны находиться в местах локализации ключевых загрязнителей (например, в контрольных колодцах промышленных предприятий). Отдельно обязательным условием является географическая привязка узлов контроля состояния СВ с внедрением геоинформационных комплексов.

Исходя из такого подхода целесообразно использовать методический аппарат ранжирующих измерительных систем (РИС) – класса измерительных систем (ИС), для которых результат измерения величины попадает в одну из категорий и число таких категорий конечно [3]. Такой алгоритм работы отличает их от ИС, которые выдают результаты в виде количественных переменных. Можно выделить два основных типа ранжирующих измерительных систем[2]: системы, в которых измерения проводит человек (контролер) при помощи своих органов чувств; и автоматические системы, в которых задачу ранжирования осуществляет электронный прибор (программируемый контроллер, датчики, фотоэлементы, электронные калибры и другие измерительные средства) – они могут работать без участия человека-контролера. Автоматические РИС часто бывают встроены в технологический процесс, хотя их методика принятия решений использует числовые значения результатов измерений, тем не менее, выводы представлены в порядковой шкале – именно поэтому они попадают под определение ранжирующих решений.

Однако в задачах экологического анализа ЦСВ целесообразно внедрять комбинированные ранжирующие измерительные системы, поскольку количество комплексов получения информации о показателях качества СВ, способных работать в оперативном режиме (или приближённо к нему), крайне незначительно (нехватка инструментариев порядка 70% от потребностей) – частично информацию, с учётом временного отставания, обоснованно консольно вводить в базу данных (БД) РИС на основе знаний экспертов и данных исследований аккредитованных лабораторий.

При этом на этапе анализа полученной и агрегированной в БД информации для поддержки принятия решения можно использовать, например, подходы статистического контроля процессов (SPC) [4]. Такая методология применяет статистические методы мониторинга и управления технологиями, что помогает обеспечивать их заданное качество. SPC включает в себя три принципа [4]: всякая работа – последовательность взаимосвязанных процессов; они все подвержены вариабельности; понимание и снижение вариабельности – ключ к получению заданного результата (экологической эффективности – выполнения требований по предельно-допустимым концентрациям (ПДК) загрязнителей на выходе ОС).

Вместе с тем теорию статистического контроля процесса можно комбинировать с применением для анализа данных ЦСВ различных математических аппаратов искусственного интеллекта [5], что значительно увеличит качество полученного прогноза опасности возникновения ЧС на водных объектах в зависимости от режимов водоотведения, включая параметры СВ и режимы работы ОС.

Также анализ работы самих очистных сооружений как элемента системы водоотведения показывает, что существующие современные технологические решения удаления поллютантов из водных растворов [6–9] крайне нуждаются в модулях управления, способных работать в условиях размытости входной информации (её недостаточности) в оперативном режиме. При этом создаются достаточно эффективные модели таких процессов[3] [10], однако их, без адекватно функционирующих измерительных систем, нет возможности широко применять на реальных объектах, в том числе с использованием статистического контроля процессов.

Таких образом, для устранения указанного противоречия, целью настоящей работы является обоснование использования ранжирующих измерительных систем и усовершенствование подходов к построению их структурных схем (для внедрения в водопроводно-канализационные хозяйства (ВКХ), обеспечивающих прогнозирования влияния СВ на очистные сооружения и водные объекты.

Объект исследования – экологическая безопасность систем водоотведения.

Предмет исследования – процессы управления экологической безопасностью систем водоотведения и закономерности ее поддержания с учетом рисков возникновения чрезвычайных ситуаций и требований энергоэффективности с использованием интеллектуальных ранжирующих измерительных систем.

---

[2] Павловская И.В. Разработка метода оценки ранжирующих измерительных систем при управлении качеством продукции и процессов: дис. … канд. техн. наук: 05.02.23. – М., 2012. – 136 л.

[3] Presence of synthetic surfactants in groundwater derived by sewage contamination / C. Corada-Fernandez, J. Jimenez-Martinez, L. Candela et al. // Eur. Geosci. Union Gen. Assem. – 2011. – Vol. 13. URL: https://www.researchgate.net/publication/281387121_Presence_of_synthetic_surfactants_in_groundwater_derived_by_sewage_contamination

Оценка негативных экологических аспектов функционирования схем централизованных систем водоотведения. Анализируя и систематизируя схемы централизованных сетей водоотведения, их узлы можно укрупнённо сгруппировать согласно формированию, транспортировке, очистке и приёму сточных вод (рисунок 1).

Исходя из существующих экологических задач и функциональных неопределенностей можно выделить ряд проблематик, решению которых должны способствовать создаваемые РИС ИМ:

ПРОБЛЕМА 1. Отсутствие измерительных средств, работающих в сегментах сети водоотведения I (колодцы), II (коллектора, насосные станции, напорные трубопроводы) (см. рисунок 1) и способных:

– в оперативном беспроводном режиме и удалённо передавать данные о качестве сточных вод;

– выдерживать агрессивную среду (щелочные или кислотные среды водных растворов, сероводород и аммиак в воздушных средах размещения оборудования);

– быть энергонезависимыми, то есть без подключения к электрической сети.

ПРОБЛЕМА 2. Отсутствие программного обеспечения, способного оценивать и прогнозировать качество сточных вод в сегментах сети водоотведения II (коллектора, насосные станции, напорные трубопроводы) (см. рисунок 1).

ПРОБЛЕМА 3. Незначительное количество программного обеспечения, способного в сегменте III (очистные сооружения) (см. рисунок 1):

– адаптивно управлять очистными сооружениями в условиях нестационарности и нелинейности качества и объёмов поступающих сточных вод;

– предлагать варианты действий технологам при спрогнозированных залповых поступлениях поллютантов, особенно токсикантов;

– прогнозировать экологическое состояние водных объектов в конкретный момент времени при известных режимных параметрах ЦСВ.

ПРОБЛЕМА 4. Отсутствие измерительных средств, способных функционировать в водных геоэкосистемах объектов (сегмент IV, см. рисунок 1):

– в оперативном беспроводном режиме и удалённо передавать данные о качестве сточных вод;

– быть энергонезависимыми, то есть без подключения к электрической сети.

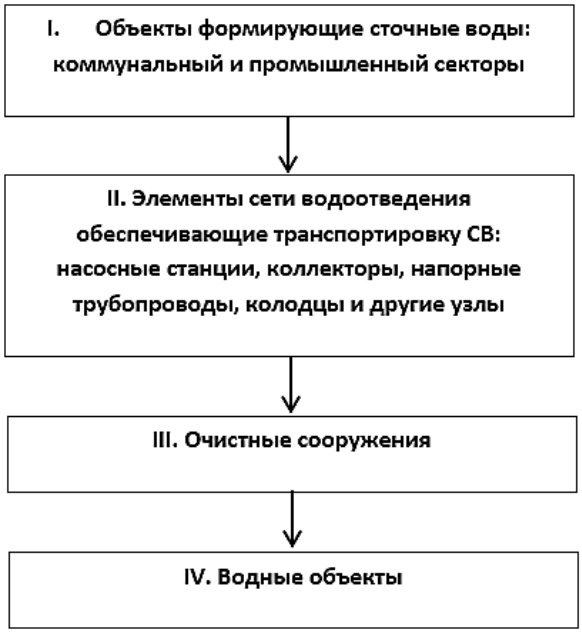


Рисунок 1. – Систематизация элементов схемы централизованных сетей водоотведения согласно функциональным узлам формирования, транспортировке, очистке и приёму сточных вод

Ключевая комплексная проблема, которая является результатом всех выше указанных, – отсутствие централизованного информационно-аналитического подхода при управлении экологической эффективностью ЦСВ. Для её решения необходимо рассматривать как единый экологический комплекс все её элементы, обеспечивающие: «формирование сточных вод – их отведение до коммунальных очистных сооружений – очистку сточных вод на ОС – приём СВ в водные объекты». Обобщая, можно выделить ряд важных негативных производственно-хозяйственных результатов отсутствия такой системности (рисунок 2).

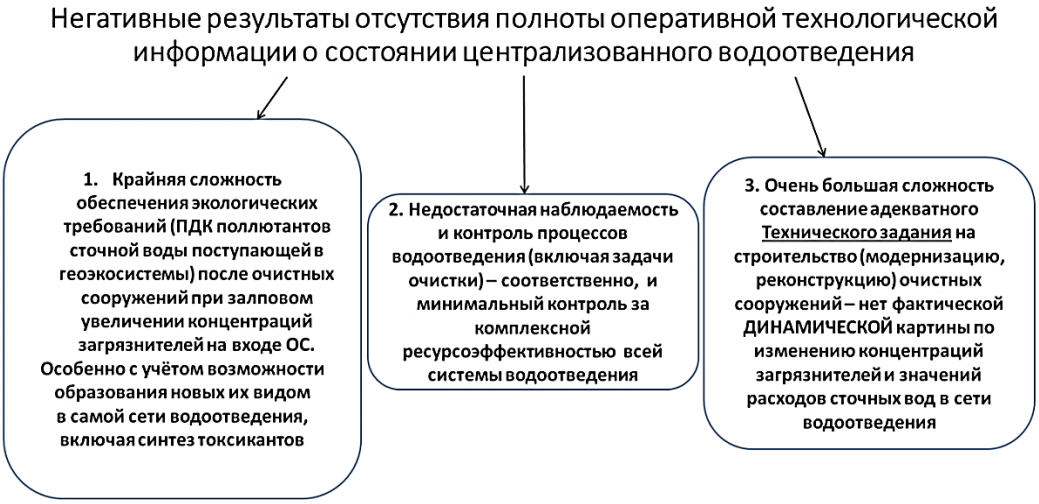


Рисунок 2. – Структурирование некоторых недостатков систем водоотведения, вызванных отсутствием оперативного получения и системного анализа технологической информации

Апробация математического аппарата искусственного интеллекта с целью получения новых знаний о режимах очистки сточных вод. Для технического регулирования процессов очистки сточных вод через реализацию агрегирования технологических параметров применили подходы нечетких нейронных сетей (ННС) с использованием алгоритма обратного распространения погрешности. Он включает следующие шаги[4]:

1. Задаются значения константы η $(0< \eta <1)$, E_{max} и малый случайный вес нейронной сети.
2. Вводятся переменные $k=1$ и $E=0$.
3. Задаётся очередная обучающая пара (x^k, y^k) (x – вход, y – эталонный выход) и обозначения:

$$x := x^k, \quad y := y^k, \tag{1}$$

и вычисляется величина выхода сети:

$$O = \frac{1}{1+e^{-W^T x}}, \tag{2}$$

где W – вектор весов выходного нейрона;

o^k – вектор выходов нейронов скрытого слоя с элементами:

$$O_i = \frac{1}{1+e^{-W_i^T x}}, \tag{3}$$

w_i – вектор весов, связанных с i-м скрытым нейроном, $i=1,2,...,L$.

4. Проводится корректировка весов выходного нейрона:

$$W := W + \eta\delta o, \tag{4}$$

где

$$\delta = (y - O)O(1 - O). \tag{5}$$

5. Корректируется вес нейронов скрытого слоя:

$$W_i := W_i + \eta\delta W_i O_i (1 - O_i), i = 1,2,...,L. \tag{6}$$

6. Корректируется (наращивается) значение функции погрешности:

$$E := E + \frac{1}{2}(y - O)^2. \tag{7}$$

Если $k < n$ (n – заданное количество итераций обучения), тогда k:=k+1 и переход к шагу 3.

[4] Штепа В.М. Науково-теоретичні засади екологічно безпечних технологій очищення промислових стічних вод: дис. … д-ра техн. наук: 21.06.01. – Суми: СумДУ, 2020. – 537 л.

7. Завершение цикла обучения. Если $E < Emax$, то окончание всей процедуры обучения. Если $E \geq Emax$, то начинается новый цикл обучения с переходом к шагу 2.

При синтезе ННС использовался пакет прикладных математических программ MatLAB ANFIS-Editor. Статистические данные, на основе которых создавалась нейросеть, являли собой результаты лабораторных исследований промышленных сточных вод предприятий мясопереработки, деревообработки, производства бытовой химии[5] по таким показателям качества водных растворов: «Концентрация фосфатов», «pH», «Концентрация синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ)», «Концентрация взвешенных частиц».

В качестве интегрального критерия, который описывает экологическую эффективность очистки СВ (без учёта затрат на их перекачку) и затраты на неё энергетических ресурсов, применено следующее выражение [11; 12]:

$$EF_Y = \frac{\left[\left(\frac{L1_{вых} - ГДК1}{ГДК1} \cdot 100\%\right) + \ldots + \left(\frac{LN_{вых} - ГДКN}{ГДКN} \cdot 100\%\right)\right] \cdot \sum_{i=1}^{N} Q_i}{\sum_{i=1}^{N} E_i}, \text{ \%/ кВт.} \quad (8)$$

где $L1_{вых},\ldots,LN_{вых}$ – фактические значения соответствующих показателей качества СВ (в единицах измерения согласно нормативным документам показателей качества СВ);

ГДК1,...,ГДКN – нормативные значения показателей качества СВ (в единицах измерения в соответствии с нормативными документами по оценке показателей качества СВ);

Q – время работы технологических агрегатов очистки, которые обеспечивают нормирования соответствующих показателей качества СВ, ч;

E – электроэнергия, затраченная на очистку, кВт·ч;

N – количество показателей качества сточных вод, штук.

Технологическое задание для выполнения требований экологически безопасного управления оборудованием согласно критерию (8) – поддерживать его значение равным (максимально близким) нулю, что соответствует режиму эколого-энергетической эффективности очистки. Физический смысл: при отрицательных значениях EF_y происходит перерасход (неэффективное использование) энергии, при положительных значениях – загрязнение окружающей среды (риск возникновения чрезвычайных ситуаций).

Адекватность созданных моделей, с использованием методов нечетких нейронных сетей согласно оптимизационной методике обратного распространения погрешности (1)–(7), подтверждена на основе оценки полученной относительной среднеквадратичной погрешности генерации всех термов (графических представлений влияния входных факторов на выходные)[6] – 1,44%.

Новые знания о влиянии значений показателей СВ на энергоэффективность их удаления (нейтрализации) были получены в виде функций принадлежности нечёткой логики [6]. Для всех входных параметров использованы качественные термы: «Незначительное влияние на энергоэффективность», «Среднее влияние на энергоэффективность», «Значительное влияние на энергоэффективность» (рисунок 3).

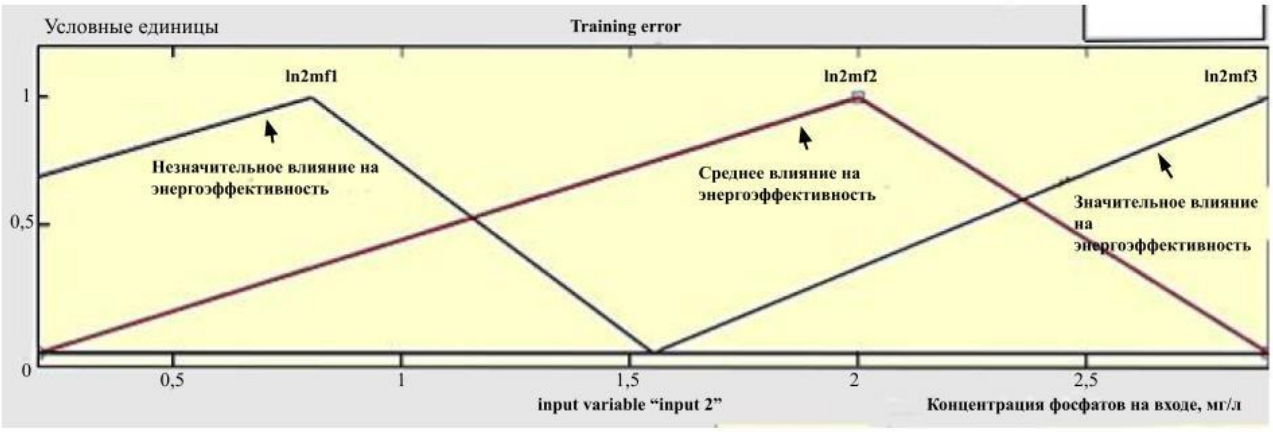


Рисунок 3. – Функции принадлежности эколого-энергетических параметров очистки сточных вод промышленных предприятий (начало)

[5] См. сноску 4.
[6] См. сноску 4.

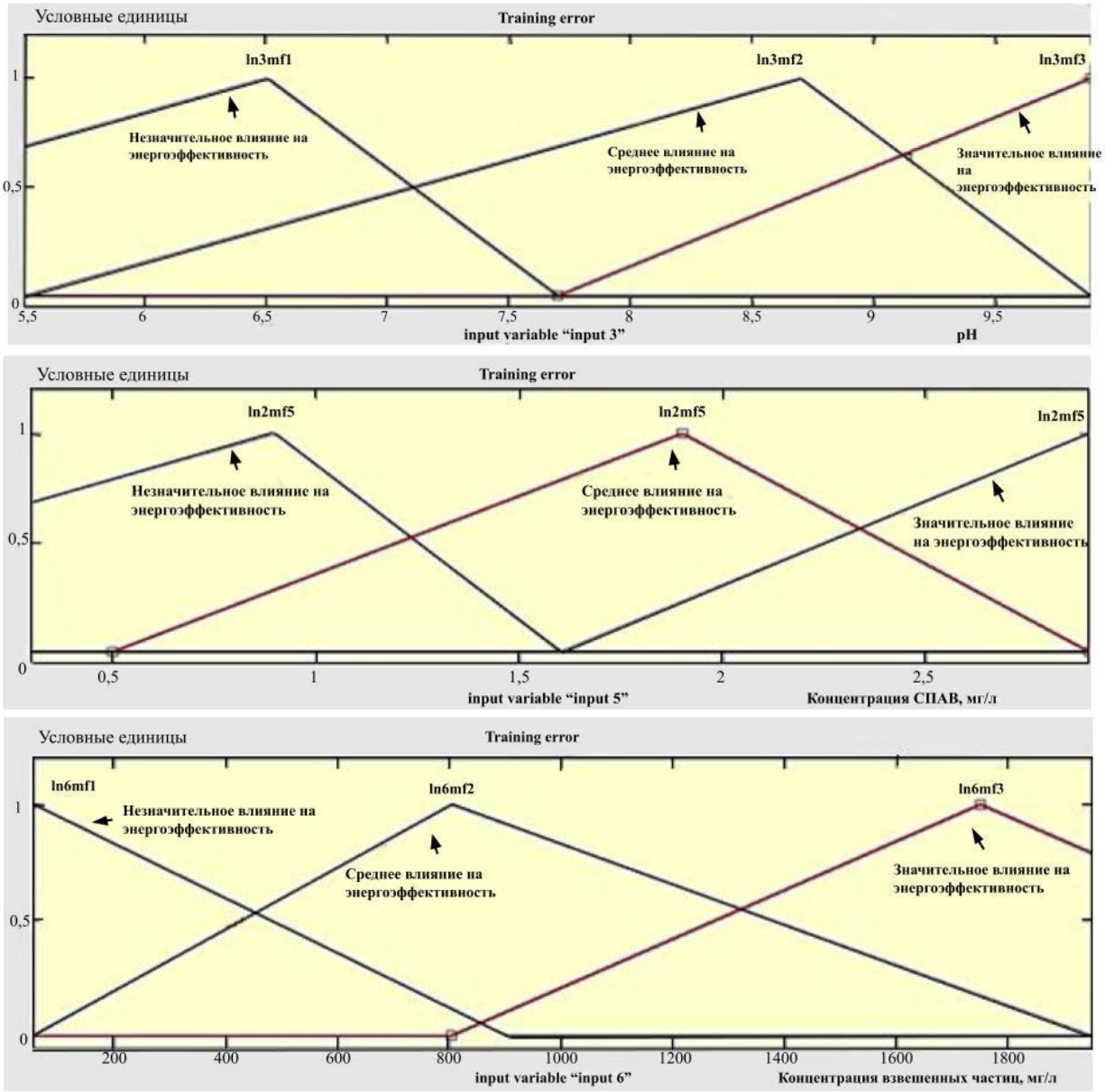


Рисунок 3. – Функции принадлежности эколого-энергетических параметров очистки сточных вод промышленных предприятий (окончание)

При этом аналитическое выражение треугольных кусочно-линейных функций рисунка 3:

$$MF(x) := \begin{cases} 1 - \dfrac{b-x}{b-a}, a \le x \le b \\ 1 - \dfrac{x-c}{c-b}, b \le x \le c \\ 0, другиеслучаи \end{cases}, \qquad (9)$$

где x – значение входной переменной;

a, b, c – некоторые числовые параметры.

Полученные функции принадлежности ННС (см. рисунок 3) позволяют, с использованием созданного на их основе программного обеспечения и информации с РИС ИМ:

– создать технологические карты технического регулирования ОС СВ с целью отслеживания потенциального воздействия значений показателей качества СВ на процессы удаления поллютантов и экологическую безопасность водных объектов, обеспечивая выполнение превентивных действий для повышения эффективности работы очистных сооружений;

– прогнозировать потенциальную возможность возникновения техногенных ЧС как на ОС, так и в водных объектах.

Алгоритмическое обеспечение ранжирующих измерительных систем импактного экологического мониторинга водоотведения, структурные схемы практического использования аппаратно-программных решений. Исходя из технологической обоснованности и экологической актуальности использования в ЦСВ РИС ИМ создан базовый алгоритм сбора данных, их анализа, принятия решений (рисунок 4) и передачи информации на верхний уровень информационно-коммуникационных систем управления ОС (рисунок 5).

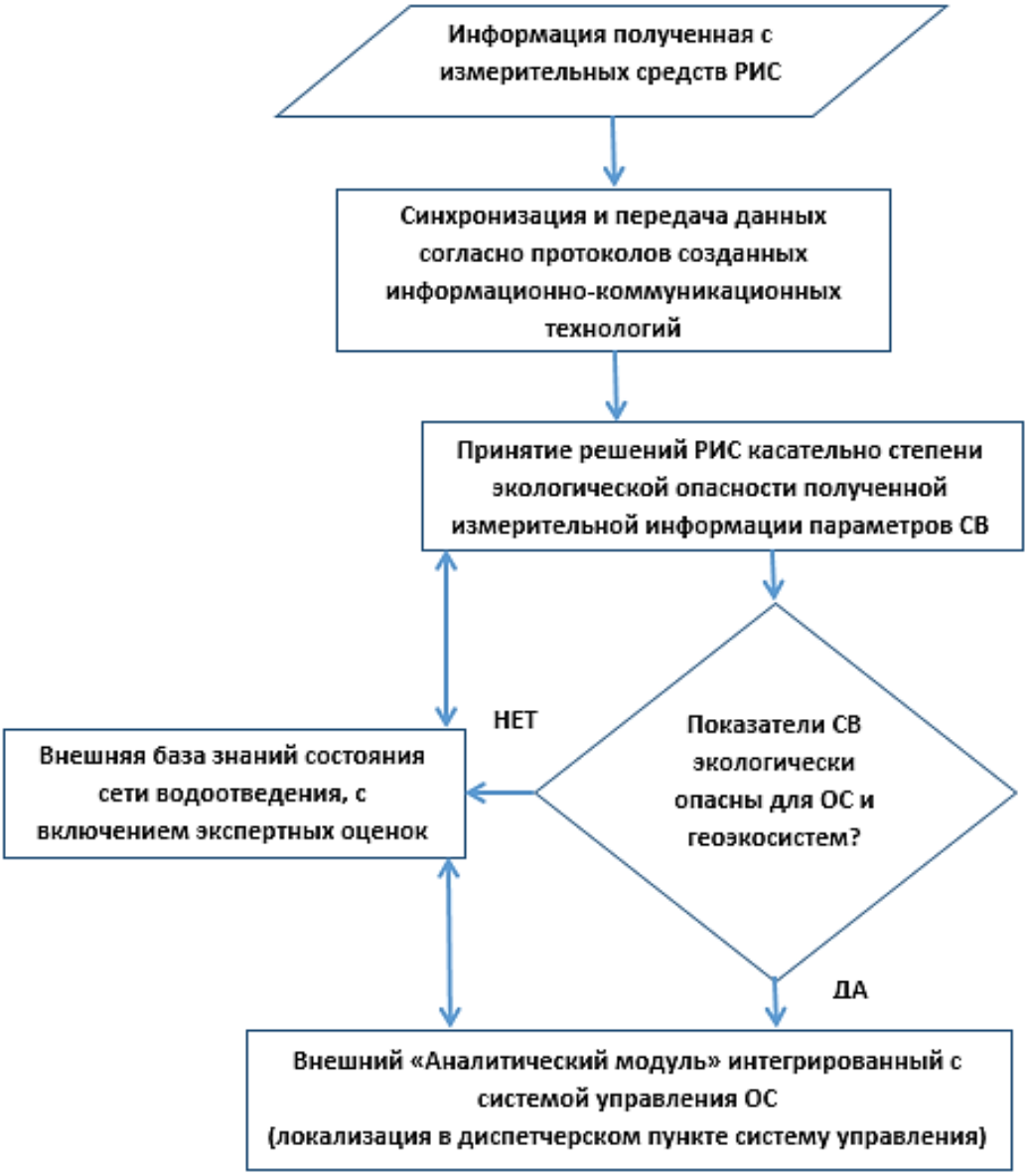


Рисунок 4. – Базовая блок-схема алгоритма функционирования ранжирующих измерительных систем импактного мониторинга водоотведения

Исходя из алгоритмического и структурного обеспечения РИС ИМ (см. рисунки 4 и 5) создана её перспективная масштабируемая распределённая схема (рисунок 6), которая интегрирует инструментальные средства измерения, лабораторные исследования, экспертные заключения и обработку информации на основе искусственного интеллекта.

Прикладные задачи, которые будут решаться с использованием такой ранжирующей измерительной системы на региональном уровне:

– адаптивное формирование экологической стратегии развития региона с учётом антропогенного действия ЦСВ на водные объекты;

– прогнозирование потенциальных опасностей негативного действия антропогенных факторов с превентивным противодействием чрезвычайным ситуациям.

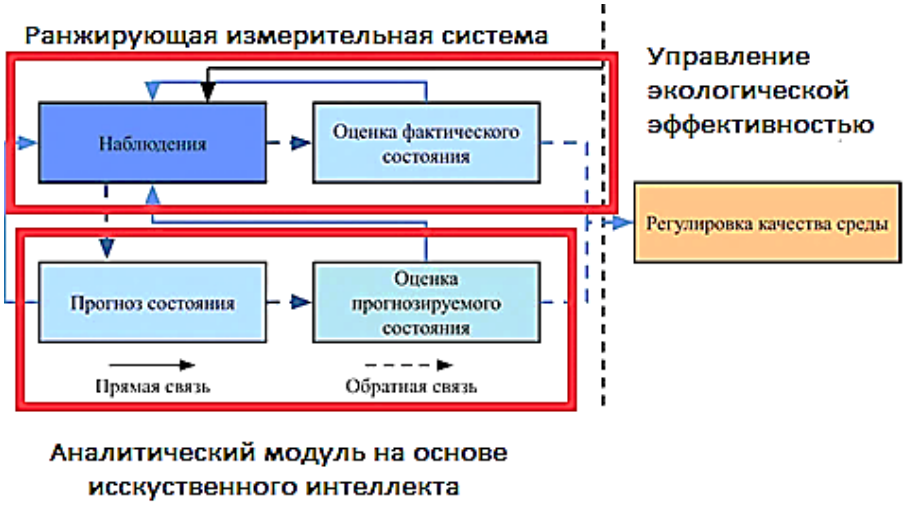


Рисунок 5. – Схема интеграции ранжирующих измерительных систем импактного мониторинга водоотведения с интеллектуальными системами управления очистными сооружениями

Рисунок 6. – Структурная схема использования ранжирующих измерительных систем импактного экологического мониторинга функционирования водоотведения на региональном уровне

В то же время формирование и практическое внедрение РИС ИМ ЦСВ с использованием концептов Web-SCADA даст возможность уменьшить промежутки времени передачи технологического контента, упростить хранение баз данных, как результат, можно будет получить такие преимущества по сравнению с классическими аналогами [13]:

– оперативное беспроводное получение информации о режимах водоотведения с максимальным охватом узлов сети централизованного водоотведения, что позволит ускорить процессы экологического управления ОС и повысить их качество;

– быстрое и адаптивное во времени ранжированное прогнозирование концентраций загрязнителей СВ до их поступления на сооружения очистки сточных вод – соответственно, создаются более веские технологические предпосылки для противодействия залповым выбросам загрязнителей в водные объекты и предупреждения там техногенных ЧС.

Практическая реализация обоснованного и созданного алгоритмического и структурного обеспечения (см. рисунки 4–6) позволит предприятиям водопроводно-канализационных хозяйств получить:

– методику интегральной оценки экологического состояния ЦСВ ВКХ, которую можно будет использовать при создании технологических регламентов;

– методику внедрения на предприятиях автоматизированных систем сбора и анализа технологической информации согласно перспективной концепции «Цифровой водоканал»;

Органы власти, проектные организации и структуры экспертизы смогут использовать:

– методический аппарат для анализа обоснованности финансовых вложений в ОС предприятий ВКХ;

– информацию для усовершенствования нормативной базы проектирования, экспертизы и эксплуатации ОС ВКХ.

Заключение. Обобщённый потенциальный эффект от внедрения РИС ИМ при экологическом анализе режимов водоотведения:

– создание комфортной экосреды для жителей населённых пунктов и обеспечение региональной водной безопасности путём выполнения требований Водной стратегии Республики Беларусь;

– повышение экологической наблюдаемости технологических процессов в сетях водоотведения (в случае коммунальных объектов с возможностью точечного выявления организации, которая выполняет ненормативный сброс сточных вод, что представляют опасность для биологических ОС и окружающей среды);

– повышение ресурсоэффективности очистных сооружений (уменьшение удельных затрат на качественную очистку 1 $м^3$ сточных вод) путём интеграции РИС ИМ в существующие системы управления ОС при возможности предупреждения их выхода из строя: например, подачей команды о поступлении через фиксированный промежуток времени в голову биологических ОС сточных вод с наличием опасных для активного ила токсикантов, что создаёт объективные предпосылки для эффективной технологической реакции (благовременного противодействия возникновению ЧС);

– создание дополнительного информационно-аналитического базиса (информационной среды) для цифровизации, соответственно, оптимизации, функционирования систем централизованного водоотведения с выполнением требований экологической безопасности и предотвращения действия ЧС;

– разработка методической основы формирования цифровой системы регионального экологического мониторинга загрязнения водных объектов путём масштабирования РИС ИМ;

– значительное уменьшение стоимости нового строительства (модернизации, реконструкции) очистных сооружений коммунальных и промышленных объектов путём создания адекватных ТЗ на их проектирование.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что впервые обоснованы и созданы структурные модели использования ранжирующих измерительных систем экологического мониторинга (импактного и регионального) систем водоотведения, что позволит увеличить управляемость процессов удаления загрязнителей из сточных вод на основе использования интеллектуального математического аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семячков К.А. Трансформация общественного сектора в условиях цифровой экономики // Журн. экон. теории. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 545–548.
2. Войтов И.В. Научные основы рационального управления и охраны водных ресурсов. – Минск: БГУ, 2000. – 386 с.
3. Гличев А.В. Основы управления качеством продукции. – М.: Стандарт, 2001. – 424 с.
4. Адлер Ю.П. Проблемы применения методов статистического управления процессами на отечественных предприятиях // Методы менеджмента качества. – 2009. – № 8. – С. 44–48.
5. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети: Теория и практика. – 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. – 381 с.
6. Validation of a quantitative image analysis methodology for the assessment of the morphology and structure of aerobic granular sludge in the presence of pharmaceutically active compounds / C. Leal, A. Val del Río, E.C. Ferreira et al. // Environmental Technology and Innovation. – 2021. – Vol. 23. – P. 101639.
7. Dychko, A., Monitoring and biochemical treatment of wastewater / A. Dychko, N. Remez, V. Kyselov et al. // Journal of Ecological Engineering. – 2020. – Vol. 21, № 4. – P. 150–159.
8. Prospects on coupling UV/H2O2 with activated sludge or a fungal treatment for the removal of pharmaceutically active compounds in real hospital wastewater / J.A. Mir-Tutusaus, A. Jaén-Gil, D. Barceló et al. // Science of The Total Environment. – 2021. – Vol. 773. – P. 145374.
9. Ecofriendly laccases treatment to challenge micropollutants issue in municipal wastewaters / F. Spina, M. Gea, C. Bicchi et al. // Environmental Pollution. – 2019. – Vol. 257. – P. 113579.

10. The Circular Model in Disposal with Municipal Waste. A Case Study of Slovakia / H. Pavolová, R. Lacko, Z. Hajduová et al. // J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – № 17(6). – P. 1839.
11. Штепа В.М., Гончаров Ф.І., Сироватка М.А. Обгрунтування та розробка критерію енергоефективності функціонування електротехнологічних систем водопідготовки // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2011. – Вип. 161. – С. 187–193.
12. Штепа В.М., Каплун В.В. Віртуальна міра водоочищення та оцінка ризиків виникнення надзвичайних ситуацій // Вимірювальна техніка та метрологія: міжвід. наук.-техн. зб. / голов. ред. Б.І. Стадник. – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2018. – Т. 79, вип. 4. – С. 5–11.
13. Штепа В.Н., Алексеевский Д.Г., Заец Н.А. Методическое обеспечение управления экологической безопасностью локальных систем очистки сточных вод // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: сб. тр.: в 2 ч. / Ин-т жилищ.-коммун. хоз-ва НАН Беларуси; под общ. ред. В.О. Китикова. – Минск: БГТУ, 2021. – Ч. 2. – С. 215–221.

REFERENCES

1. Semyachkov, K.A. (2018). Transformatsiya obshchestvennogo sektora v usloviyakh tsifrovoi ekonomiki [Transformation of the Public Sector in the Digital Economy]. *Zhurnal ekonomicheskoi teorii [Journal of Economic Theory], 15(3),* 545–548. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Voitov, I.V. (2000). *Nauchnye osnovy ratsional'nogo upravleniya i okhrany vodnykh resursov*. Minsk: BGU. (In Russ.).
3. Glichev, A.V. (2001). *Osnovy upravleniya kachestvom produktsii*. Moscow: Standart. (In Russ.).
4. Adler, Yu.P. (2009). Problemy primeneniya metodov statisticheskogo upravleniya protsessami na otechestvennykh predpriyatiyakh [Problems of application of methods of statistical process control at domestic enterprises]. *Metody menedzhmenta kachestva [Methods of quality management], (8),* 44–48. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Kruglov, V.V. & Borisov, V.V. (2002). *Iskusstvennye neironnye seti: Teoriya i praktika*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom. (In Russ.).
6. Leal, C., Val del Río, A., Ferreira, E.C., Mesquita, D. & Amaral, A.L. (2021). Validation of a quantitative image analysis methodology for the assessment of the morphology and structure of aerobic granular sludge in the presence of pharmaceutically active compounds. *Environmental Technology and Innovation, (23),* 101639. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101639.
7. Dychko, A., Remez, N., Kyselov, V., Kraychuk, S., Ostapchuk, N. & Kniazevych, A. (2020). Monitoring and biochemical treatment of wastewater. *Journal of Ecological Engineering, 21(4),* 150–159. DOI: 10.12911/22998993/119811.
8. Mir-Tutusaus, J.A., Jaén-Gil, A., Barceló, D., Buttiglieri, G., Gonzalez-Olmos, R., Rodriguez-Mozaz, S. … Sarrà, M. (2021). Prospects on coupling UV/H2O2 with activated sludge or a fungal treatment for the removal of pharmaceutically active compounds in real hospital wastewater. *Science of The Total Environment, (773),* 145374. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.145374.
9. Spina, F., Gea, M., Bicchi, C., Cordero, C., Schilirò, T. & Varese, G.C. (2019). Ecofriendly laccases treatment to challenge micropollutants issue in municipal wastewaters. *Environmental Pollution, (257),* 113579. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113579.
10. Pavolová, H., Lacko, R., Hajduová, Z., Šimková, Z. & Rovňák, M. (2020). The Circular Model in Disposal with Municipal Waste. A Case Study of Slovakia. *J. Environ. Res. Public Health, 17(6),* 1839. DOI: 10.3390/IJERPH17061839.
11. Shtepa, V.M., Goncharov, F.I. & Sirovatka, M.A. (2011). Obgruntuvannya ta rozrobka kriteriyu energoefektivnosti funktsionuvannya elektrotekhnologichnikh sistem vodopidgotovki [Justification and development of the energy efficiency criterion for the operation of electrotechnological water treatment systems]. *Nauk. visn. Nats. un-tu bioresursiv i prirodokoristuvannya Ukraïni. Ser. Tekhnika ta energetika APK [Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Technology and energy of agricultural industry], (161),* 187–193. (In Ukrain., abstr. in Engl.).
12. Shtepa, V.M. & Kaplun, V.V. (2018). Virtual'na mira vodoochishchennya ta otsinka rizikiv viniknennya nadzvichainikh situatsii [Virtual measure of water purification and risks assessment of emergency situations]. In B.I. Stadnik (Eds.) *Vimiryuval'na tekhnika ta metrologiya:* mizhvid. nauk.-tekhn. zb. Vol. 79, iss. 4 (5–11). Lviv: Vidavnitstvo L'vivs'koï politekhniki. (In Ukrain., abstr. in Engl.).
13. Shtepa, V.N., Alekseevskii, D.G. & Zaets, N.A. (2021). Metodicheskoe obespechenie upravleniya ekologicheskoi bezopasnost'yu lokal'nykh sistem ochistki stochnykh vod (215–221). In V.O. Kitikov (Eds.) *Nauchno-tekhnicheskii progress v zhilishchno-kommunal'nom khozyaistve*: v 2 ch. Ch. 2. Penza: Nauka i Prosveshchenie. (In Russ.).

Поступила 02.02.2023

RATIONALE AND SCHEMES USE RANKING MEASURING SYSTEMS OF ENVIRONMENTAL MONITORING AND INTELLIGENT ANALYSIS WATER DISPOSAL MODES

V. SHTEPA[1], N. ZOLOTYH[2], S. KIREEV[3]
([1]Polessky State University, Pinsk,
[2]National Research Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky,
[3]Penza State University)

Based on the analysis of environmental shortcomings in the functioning of centralized sewerage systems, the technological feasibility of using ranking measuring systems for impact monitoring in order to prevent a negative technogenic impact on geoecosystems is substantiated. Structural schemes for the practical implementation of such solutions have been developed and proposed. Structural models have been created for the use of intelligent ranking measuring systems to predict the ecological state of wastewater disposal systems and water bodies with a reduction in the risks of emergency situations.

Keywords: *water disposal, water bodies, environmental efficiency, ranking measuring systems, data mining, emergency situations.*

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО

Лазовский Д.Н., Чапаранганда Э. Экспериментально-теоретическое исследование изгибаемых железобетонных элементов, восстановленных после разрушения 2
Гуринович В.Ю., Леонович С.Н., Поздняков Д.А. Тенденции и направления развития индустриального домостроения в мировой и отечественной практике жилищного строительства 10
Малюк В.В., Малюк В.Д., Леонович С.Н., Колодей А.В. Проектирование и технология долговечного бетона для морских портовых и транспортных сооружений в условиях морозного воздействия 19
Беломесова К.Ю., Павлова И.П. Аналитическая модель расчета количества базальтовой фибры для получения дисперсно-армированного напрягающего бетона оптимальной структуры 27
Васильев А.А. Прогнозирование остаточного ресурса железобетонных элементов и конструкций по зависимости физического износа 32
Мартыненко Т.М., Смиловенко О.О., Максимович В.А., Мелюх М.В. Анализ механических характеристик узловых соединений строительных конструкций на основе моделирования в среде ANSYS 39
Нияковский А.М., Ларина Д.В., Батенкова А.В. Выбор источника тепловой энергии в системах теплоснабжения с учетом требований декарбонизации и энергосбережения 45
Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д., Саливончик И.Г. Опыт использования метода закачки воды в подземный пласт с последующей ее откачкой в систему водоснабжения населенных пунктов в Республике Беларусь 54
Соловьёв А.А. Натурные исследования северной части комплекса бывшего «Гранд Отеля» 63

ГЕОДЕЗИЯ

Долгий П.С. Программные особенности разработки ГИС-проекта «Геодинамика и техногенез Беларуси» 74
Маркович К.И., Ялтыхов В.В., Дегтярев А.М. Совершенствование алгоритма получения параметров оптимальной плоскости для фасадной съемки 82

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Поспелов А.В., Мацукевич И.В., Касач А.А., Комаров М.А., Рожко С.Н. Коррозия нержавеющих сталей в дезинфицирующих растворах 90
Штепа В.Н., Золотых Н.Ю., Киреев С.Ю. Обоснование и схемы использования ранжирующих измерительных систем экологического мониторинга и интеллектуального анализа режимов водоотведения 94