

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Tom I.
Rok 1818.

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

№ 3(38), 2024

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 ЎНІВЕРСІТЭТА
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

У серыі F навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваўне 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 15.11.2024. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.
Усл. печ. л. 7,90. Уч.-изд. л. 9,53. Тираж 50 экз. Заказ 401.

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.012.45

DOI 10.52928/2070-1683-2024-38-3-2-11

НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
С КРУГЛЫМИ ТРУБАМИ ПРИ ИЗГИБЕ

д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ¹⁾, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ²⁾,
канд. техн. наук, доц. А.И. КОЛТУНОВ³⁾, канд. техн. наук А.М. ХАТКЕВИЧ⁴⁾
(^{1), 3), 4)} Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, (²⁾ ООО «СофтКлуб», Минск)
¹⁾ d.lazovski@psu.by, ²⁾ d.gluhov@psu.by, ³⁾ a.koltunov@psu.by, ⁴⁾ a.khatkevich@psu.by
¹⁾ ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5278-938X>

Рассмотрен вопрос применимости нелинейной деформационной модели для расчета изгибаемых трубобетонных элементов с круглыми трубами. Предложен критерий разрушения изгибаемого трубобетонного элемента без ограничения деформаций бетона при сжатии. Преимуществом данного критерия разрушения является возможность учета высокой степени перераспределения усилий в поперечном сечении изгибаемого трубобетонного элемента после достижения стальной трубы предела текучести и отсутствие необходимости нормирования предельной сжимаемости бетона. Произведено сопоставление результатов нелинейного расчета предельного усилия с экспериментальными данными из сформированной выборки исследований. Подтверждена применимость нелинейного расчета с учетом предложений авторов для трубобетонных элементов с круглыми трубами при изгибе для расчета момента, соответствующего началу текучести стали трубы.

Ключевые слова: трубобетонный элемент, нелинейная деформационная модель, диаграммы деформирования, критерий разрушения.

Введение. Широкое применение трубобетонных элементов для тяжело нагруженных конструкций зданий и сооружений объясняется их эффективной работой при сжатии [1–4]. Бетон внутри трубы находится в условиях стесненного поперечного расширения, что благоприятно сказывается на его физико-механических характеристиках, повышая, в частности, прочность аналогично косвенному армированию [5–7]. Наибольшую эффективность имеют центрально и внецентренно с малыми эксцентриситетами сжатые трубобетонные элементы [8]. При этом эффективность работы трубобетонных элементов при изгибе является менее изученной областью исследований¹ [8–12]. В изгибаемых трубобетонных элементах стальная труба является одновременно продольной арматурой в растянутой и сжатой зонах, а также поперечной в зоне среза. Заключенный в трубу бетон препятствует потере устойчивости стенок трубы и так же, как и при сжатии, находится в условиях стесненной деформации во всех направлениях, что благоприятно сказывается на его трещиностойкости, прочности и деформативности [13; 14].

Последние исследования свидетельствуют об эффективности наполнения трубы для повышения ее прочности при изгибе. Стальная труба с заглушенными торцами, полностью заполненная водой, имеет прочность в 5 раз превышающую для аналогичной трубы без заполнения [15]. При изгибе «гидравлическая балка» из стальной трубы стремится деформироваться с уменьшением ее внутреннего объема, но несжимаемая жидкость препятствует деформации стальной трубы. В изгибаемом трубобетонном элементе роль несжимаемой жидкости играет бетон.

Работа под нагрузкой изгибаемых трубобетонных элементов является предметом исследования до настоящего времени. Особенно важными являются вопросы, связанные с расчетом параметров их напряженно-деформированного состояния [14–18]. На основании имеющихся базовых исследований трубобетонных элементов как одного из видов сталежелезобетонных элементов издан нормативный документ СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования»². В нормах в качестве основного для изгибаемых трубобетонных элементов принято допущение о том, что расчетные сопротивления бетона и металла трубы соответствуют одноосному напряженному состоянию. Работа бетона в растянутой зоне не учитывается. Принятая схема усилий при прямоугольных эпюрах распределения нормальных напряжений по поперечному сечению изгибаемого трубобетонного элемента с учетом совместной работы бетона и трубы в предельном по прочности состоянии представлена на рисунке 1.

¹ Казимагомедов Ф.И. Эффективные трубобетонные изгибаемые элементы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Харьков, 2015. – 20 с.

² СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные: Правила проектирования: свод правил: издание официальное: утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1030/пр: дата введения 01 июля 2017 г. – URL: <http://www.consultant.ru>.

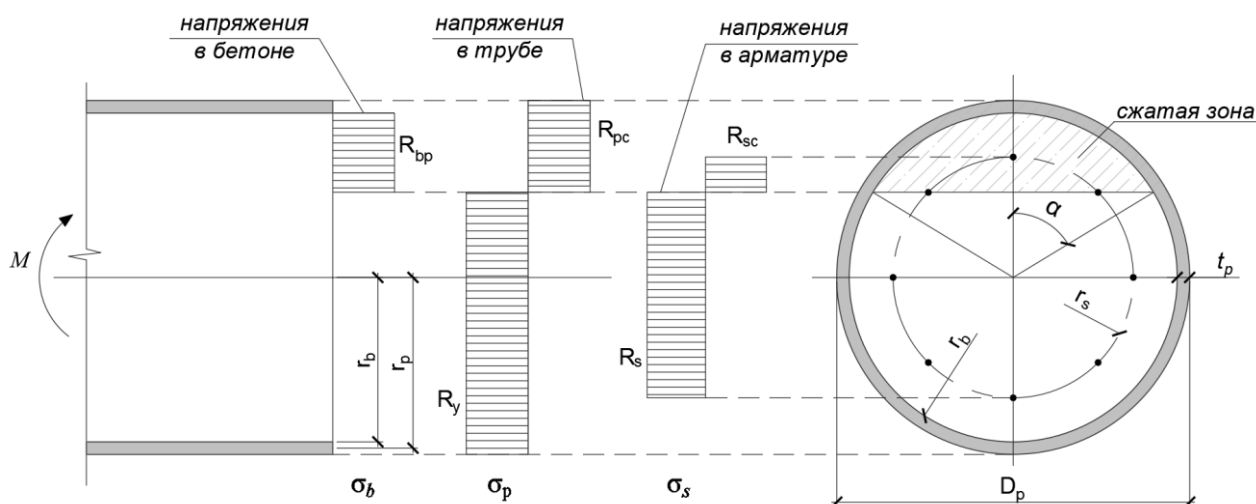


Рисунок 1. – Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого трубобетонного элемента, при его расчете по прочности

Значение предельного изгибающего момента M_{ult} относительно центра тяжести для изгибаемых элементов определяют по формуле

$$M_{ult} = \frac{2}{3} r_b^3 R_{bp} \sin^3 \alpha + \frac{1}{\pi} A_s r_s \sin \alpha (R_s + R_{sc}) + \frac{1}{\pi} A_p r_p \sin \alpha (R_y + R_{pc}), \quad (1)$$

где угол α , радианы;

A_s – площадь всей стержневой арматуры;

r_b – радиус бетонного ядра;

r_s – радиус окружности, на которой расположена стержневая арматура;

r_p – радиус срединной поверхности трубы.

Угол α , радианы, находят из уравнения

$$r_b^2 \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) R_{bp} + \frac{\alpha}{\pi} A_s R_{sc} - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) A_s R_s + \frac{\alpha}{\pi} A_p R_{pc} - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) A_p R_y = 0. \quad (2)$$

Предполагается сплошное заполнение трубы бетоном и не решается вопрос расчета при более сложных поперечных сечениях (с полостями, в том числе, смещенными относительно центра трубы, с рассредоточенным размещением арматуры в сжатой и растянутой зонах и др.).

В работе [19] авторы предлагают нелинейный расчет внецентренно сжатых трубобетонных элементов с учетом упругопластической работы бетона как при сжатии, так и при растяжении, в соответствии с трехлинейными диаграммами деформирования для железобетонных конструкций³. В настоящем исследовании предлагается диаграмму деформирования бетона принять нелинейной, аналогично железобетонным⁴ и сталежелезобетонным элементам [20; 21], но с горизонтальным участком при сжатии (рисунок 2). Данное предложение объясняется успешной апробацией нелинейной диаграммы деформирования бетона при сжатии и растяжении для сталежелезобетонных конструкций [20; 21]. Модернизация диаграммы бетона при сжатии введением горизонтального участка без ограничения предельных деформаций и ограничением нормальных напряжений вызвана результатами исследования [19], в которых отмечается надежная работа при изгибе трубобетонных элементов с сохранением совместной работы трубы и бетона на всех стадиях, включая закритическую (относительные деформации стали трубы превышали предел текучести), ограничением возможности поперечного расширения бетона сжатой зоны в трубе.

В работе [19], равно как и ряде других исследований [22–29], предлагаются методики нелинейного расчета сжатых трубобетонных элементов без представления в печати их практической реализации и сопоставления с экспериментальными данными. В связи с этим целью настоящей работы является исследование применимости нелинейного деформационного расчета для изгибаемых трубобетонных элементов на примерах результатов экспериментальных исследований [16].

³ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Свод правил: издание официальное: утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/пр: дата введения 20 июня 2019 г. – URL: <http://www.consultant.ru>.

⁴ СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: РУП «Стройтехнорм» М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 236 с.

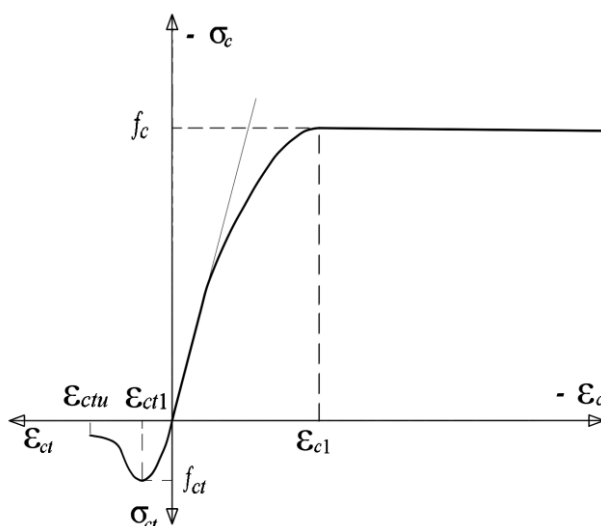


Рисунок 2. – Расчетные диаграммы деформирования бетона

Предпосылки расчета. Согласно деформационной модели поперечное сечение изгибаемого трубобетонного элемента, состоящего из стальной трубы с наружным диаметром D_p и толщиной стенки t_p с бетонным наполнением, представляется как совокупность элементарных площадок (рисунок 3), в пределах которых напряжения считаются равномерно распределенными. Распределение относительных деформаций по высоте поперечного сечения трубобетонного элемента подчиняется гипотезе плоских сечений продольных относительных деформаций бетона и трубы растянутой и сжатой зон.

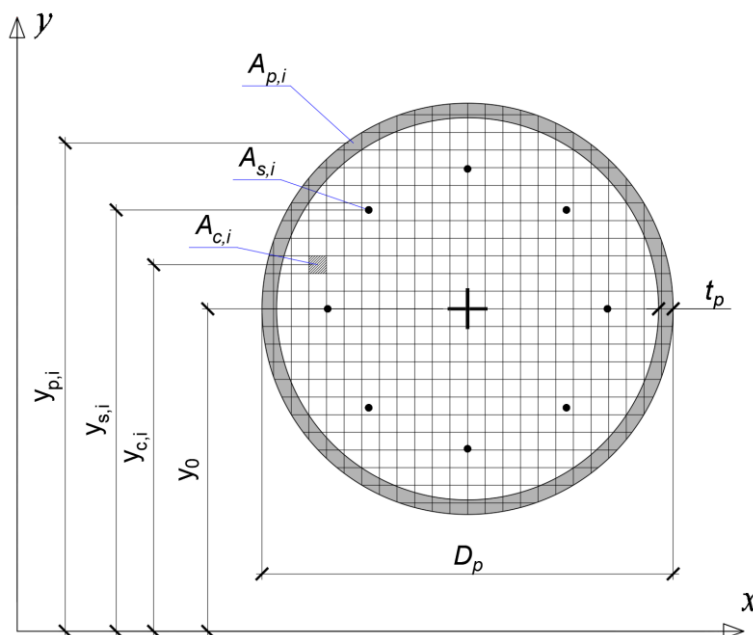


Рисунок 3. – Расчетное поперечное сечение изгибаемого трубобетонного элемента

В качестве аппроксимации диаграммы деформирования бетона призмочной прочностью при сжатии f_c с начальным модулем упругости E_c , устанавливающей зависимость между напряжениями при сжатии (растяжении) σ_c (σ_{ct}) и относительными деформациями ϵ_c (ϵ_{ct}), принимаем предложенную нелинейную диаграмму состояния бетона (см. рисунок 2) без ограничения ее длины по деформациям при сжатии с целью получения полного перераспределения усилий между бетоном и стальной трубой изгибаемого трубобетонного элемента. Многоосное напряженное состояние бетона при сжатии и растяжении изгибаемого трубобетонного элемента не учитывается. Предельная растяжимость бетона ϵ_{ctu} определяется по формуле [30]:

$$\epsilon_{ctu} = \frac{K \cdot \epsilon_{ct1}}{2}; \quad K = 6,4 + 0,1223 f_c. \quad (3)$$

Расчетную диаграмму деформирования стали трубы при сжатии и растяжении сопротивлением f_y с начальным модулем упругости E_s , устанавливающей зависимость между напряжениями σ_s и относительными деформациями ε_s , принимаем согласно^{5,6} с линейными участками и ограничением относительных деформаций ε_p (рисунок 4).

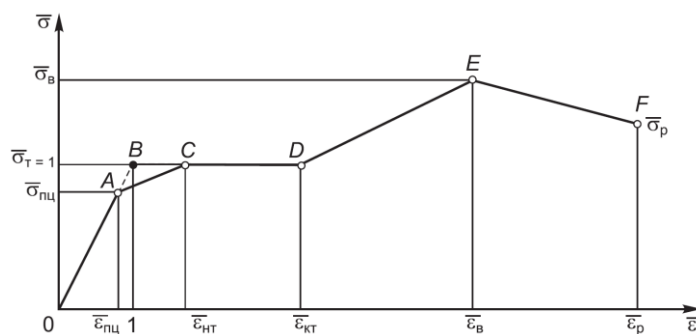


Рисунок 4. – Расчетная диаграмма деформирования стали трубы⁷

Система уравнений для расчета параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемого трубобетонного элемента, состоящая из уравнений равновесия и гипотезы плоских сечений, описывающей положение плоскости распределения относительных деформаций по его поперечному сечению, имеет вид:

$$\begin{cases} \sum \sigma_{c,i}(\varepsilon(y_{c,i})) A_{c,i}(y_{c,i})(y_{c,i} - y_0) + \sum \sigma_{p,i}(\varepsilon(y_{p,i})) A_{p,i}(y_{p,i})(y_{p,i} - y_0) - M = 0 \\ \sum \sigma_{c,i}(\varepsilon(y_{c,i})) A_{c,i}(y_{c,i}) + \sum \sigma_{p,i}(\varepsilon(y_{p,i})) A_{p,i}(y_{p,i}) = 0 \\ \varepsilon(y_{c,i}) = \frac{1}{r_y} (y_{c,i} - y_0) \\ \varepsilon(y_{p,i}) = \frac{1}{r_y} (y_{p,i} - y_0) \end{cases}, \quad (4)$$

где $\sigma(y)$, $\varepsilon(y)$ – нормальные напряжения, относительные деформации в элементарной площадке бетона, стали трубы с координатой y ;

$A_c(y)$, $A_p(y)$ – площадь поперечного сечения элементарной площадки соответственно бетона и трубы с координатой y ;

y_0 – координата центра тяжести поперечного сечения изгибаемого трубобетонного элемента;

$1/r_y$ – кривизна продольной оси трубобетонного элемента в плоскости оси y .

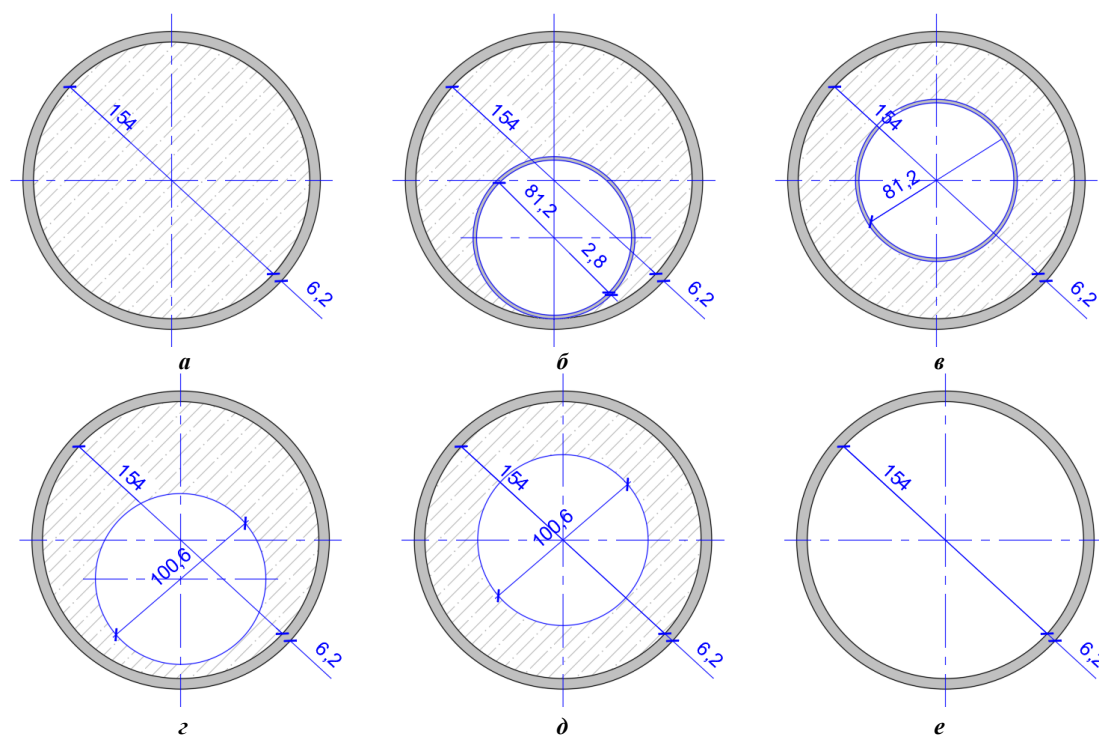
Критерием разрушения изгибаемого трубобетонного элемента принимаем максимальный изгибающий момент от внешних воздействий, который воспринимает элемент. Максимальное значение изгибающего момента M_u , при котором процесс последовательных приближений сходится (соблюдаются условия равновесия и условие совместности деформаций (4)), соответствует прочности трубобетонного элемента. Преимуществом такого критерия разрушения является отсутствие необходимости нормирования предельной сжимаемости бетона и учет высокой степени перераспределения усилий в поперечном сечении трубобетонного элемента. Критерием разрушения стали трубы при растяжении принимается достижение ею относительных деформаций, соответствующих разрыву.

Результаты исследования и их анализ. Для исследования применимости нелинейного деформационного расчета для изгибаемых трубобетонных элементов различных поперечных сечений были приняты результаты экспериментальных исследований [16]. Поперечные сечения опытных образцов с их геометрическими размерами приведены на рисунке 5. Проведены испытания балок из трубобетона, со сплошным заполнением (рисунок 5, а) или частичным (рисунок 5, б–д) с внутренней полостью, в том числе, смещенной в сторону растянутой зоны, где бетон работает неэффективно (рисунок 5, б–г), а дополнительная труба меньшего диаметра полости в сторону растянутой зоны (рисунок 5, б) позволяет увеличить в ней внутренние усилия. Опытные образцы заполнялись бетоном: с маркировкой серии ИВ – вибрированным; с маркировкой серии ИЦ – центрифугированным. Кроме того, были испытаны при изгибе стальные трубы без заполнения бетоном. Схема испытания трубобетонных балок – однопролетная балочная, с шарнирными опорами и двумя сосредоточенными силами в пролете. Прочностные и деформационные характеристики бетона и стали трубы опытных образцов приведены в таблице 1. Приняты следующие обозначения: D_p – наружный диаметр трубы; t_p – толщина стенки трубы; t_c – толщина слоя бетона по периметру трубы; σ_y , σ_u , E_s – предел текучести, временное сопротивление и модуль упругости стали трубы соответственно; f_c – призмная прочность бетона заполнения.

⁵ СП 5.04.01-2021. Стальные конструкции. – Минск: РУП «Стройтехнорм» М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 147 с.

⁶ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Основные положения. – Свод правил: издание официальное: утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 126/пр: дата введения 27 августа 2017 г. – URL: <http://www.consultant.ru>.

⁷ См. сноску 5.



а – ИВ-2-2; б – ИВ-2-2ТВ; в – ИВ-2-2Т; г – ИВ-2-2ПВ; д – ИВ-2-2П; е – И-2

Рисунок 5. – Поперечные сечения опытных образцов [17]

Таблица 1. – Прочностные и деформационные параметры бетона и стали трубы опытных образцов [17]

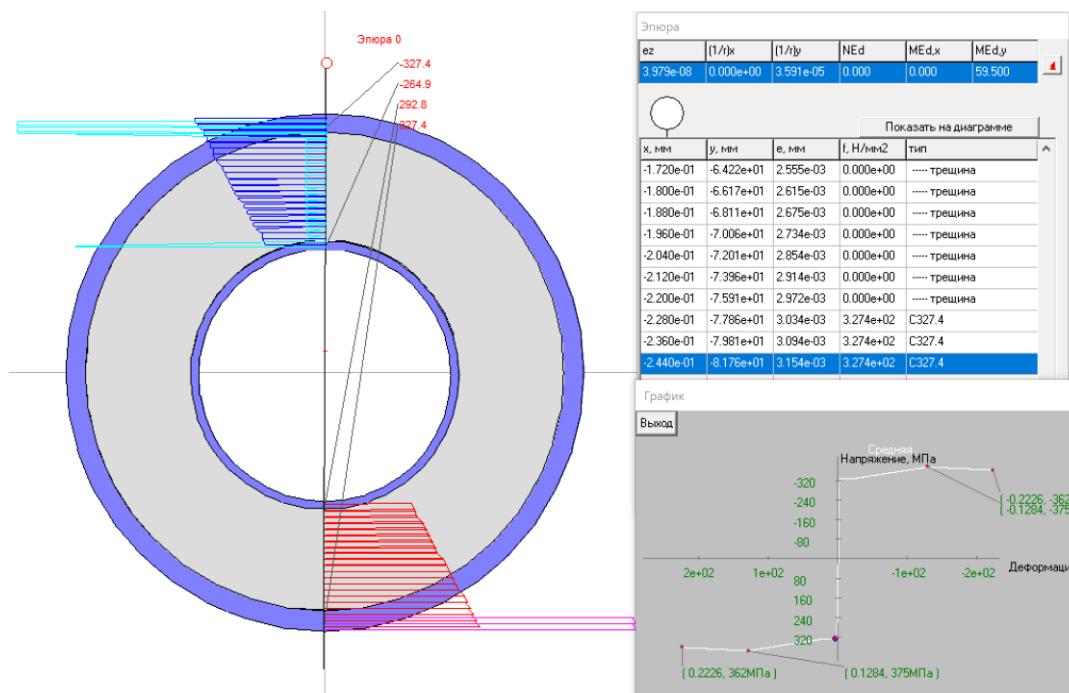
Шифр серии	D_p , мм	t_p , мм	t_c , мм	σ_y , МПа	σ_u , МПа	$E_s \cdot 10^{-5}$, МПа	f_c , МПа
ИВ-1-1	102,3	2,3	сплошной	310	375	2,10	40,0
ИВ-2-2	166,4	6,2	сплошной	327,4	375	2,25	22,5
ИВ-2-2Т	166,4	6,2	33,6	327,4	375	2,25	22,5
ИВ-2-2ТВ	166,4	6,2	33,6	327,4	375	2,25	22,5
ИВ-2-2П	166,4	6,2	27,8	327,4	375	2,25	22,5
ИВ-2-2ПВ	166,4	6,2	27,8	327,4	375	2,25	22,5
ИВ-3-3	325,0	8,0	сплошной	253,4	270	1,67	15,0
ИЦ-3-4	325,0	8,0	60	253,4	270	1,67	24,0
ИЦ-3-6	325,0	8,0	72	253,4	270	1,67	24,0
ИЦ-3-7	325,0	8,0	33	253,4	270	1,67	24,0
ИЦ-3-8	325,0	8,0	30	253,4	270	1,67	24,0
И-1	102,3	2,3	-	310	375	2,10	-
И-2	166,4	6,2	-	327,4	375	2,25	-
И-3	325,0	8,0	-	253,4	375	1,67	-

При испытании фиксировали нагрузки, соответствующие: продольным деформациям в сжатой зоне элемента, равным пределу текучести трубы (M_1); максимальной нагрузке, которую способен выдержать элемент (M_2). Расчет прочности изгибаемого труботонного элемента (M_1) в [16] выполнялся при треугольной эпюре в сжатой зоне сечения в бетоне и трубе и треугольной в растянутой зоне только в трубе. Работа бетона в растянутой зоне не учитывалась. Учет объемного напряженного состояния стали трубы и бетона производился коэффициентами эффективности к расчетным сопротивлениям: стали трубы $\alpha = 1,12$; бетона $\beta = 2$. Расхождение результатов расчета с опытными данными не превышало 12,3% [16].

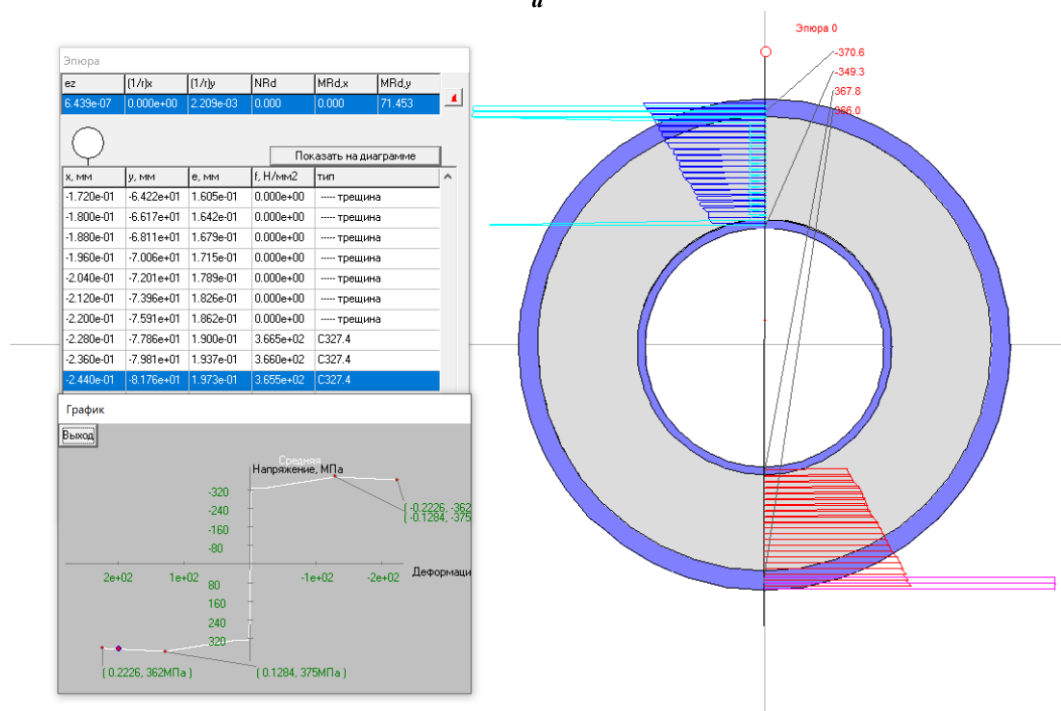
Вычисление предельных значений изгибающего момента M_2 , соответствующего исчерпанию прочности изгибаемого труботонного элемента, не производилось. Отмечалась высокая надежность труботона (опытные значения M_2 превышали M_1 в 1,06...1,64 раза) и совместная работа бетона и трубы до достижения предельного изгибающего момента M_2 . Отмечалось, что опытные образцы изгибаемых труботонных элементов не удалось разрушить, хотя в сжатой и растянутой зонах были достигнуты продольные деформации, значительно превышающие предел текучести стали трубы. Высокая степень надежности конструкций из труботона и их способность длительное время выдерживать нагрузку на стадии пластической работы труботонного элемента отмечается также и в работе [31].

В современных нормативных документах предъявляется обязательное требование общей живучести сооружения – обеспечение прочности и устойчивости формы и положения остальных элементов при выходе из строя отдельных конструктивных элементов. Возможность учета работы труботетонных изгибаемых элементов в пластической стадии их работы позволяет соблюсти данное требование при проектировании сооружений с их использованием.

Предлагаемый нелинейный расчет и критерий разрушения изгибаемых труботетонных элементов на основе полных диаграмм деформирования бетона и стали трубы позволяет получать параметры напряженно-деформированного состояния на любой стадии их работы, включая предельную по прочности, которой соответствует изгибающий момент M_2 . На рисунке 6 приведен пример результатов вычисления распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения труботетонного элемента ИВ-2-2Т при достижении сталью трубы предела текучести и в предельной стадии перед разрушением.



a



б

Рисунок 6. – Результаты расчета изгибаемого труботетонного элемента при: а – $M_1=59,5$ кН·м; б – $M_1=71,5$ кН·м (цифры справа от поперечного сечения – нормальные напряжения в МПа)

С целью верификации предлагаемого нелинейного расчета изгибаемых трубобетонных элементов проведено сопоставление результатов расчета с опытными данными из сформированной выборки исследований [16] на двух стадиях их работы под нагрузкой (M_1 – при изгибающем моменте, соответствующем относительным деформациям начала текучести стали трубы; M_2 – при изгибающем моменте, соответствующем предлагаемому критерию разрушения) (таблица 2).

Таблица 2. – Сопоставление результатов нелинейного расчета с опытными данными

Шифр серии	$M_{exp(1)}$, кНм	$M_{th(1)}$, кНм	$M_{exp(1)}$ $M_{th(1)}$	$M_{exp(2)}$, кНм	$M_{th(2)}$, кНм	$M_{exp(2)}$ $M_{th(2)}$
ИВ-1-1	8,4	8,10	1,04	13,8	9,23	1,50
ИВ-2-2	52,3	52,3	1,00	63,0	65,3	0,96
ИВ-2-2Т	59,5	59,5	1,00	64,8	71,5	0,91
ИВ-2-2ТВ	56,0	63,0	0,89	68,6	75,9	0,90
ИВ-2-2П	52,5	55,0	0,95	60,2	64,4	0,93
ИВ-2-2ПВ	55,3	58,0	0,95	56,0	64,3	0,87
ИВ-3-3	210,0	210,0	1,00	305,0	233,9	1,30
ИЦ-3-4	225,0	225,0	1,00	332,0	240,5	1,38
ИЦ-3-6	210,0	225,0	0,93	313,0	241,4	1,29
ИЦ-3-7	226,0	225	1,00	314,0	234,4	1,34
ИЦ-3-8	215,0	223	0,96	316,0	233,2	1,35
И-1	8,6	6,20	1,38	10,5	7,8	1,35
И-2	36,5	47	0,78	49,0	58,1	0,84
И-3	187,0	187,0	1,00	225,0	212,4	1,06

Результаты сопоставления данных нелинейного расчета изгибаемых трубобетонных элементов при изгибающем моменте начала текучести трубы (M_1) показывает удовлетворительную сходимость с опытными данными из работы [16]. Аналогичное сопоставление при предельном изгибающем моменте (M_2) после достижения сталью трубы предела текучести показывает значительный разброс результатов, что может быть объяснено за пределами состоянием бетона и стали трубы в виде преждевременного смятия в сжатой зоне, нарушением сцепления бетона с трубой, которые не учитываются в предлагаемом расчете.

При дальнейшем совершенствовании методик расчета трубобетонных элементов предлагаемый нелинейный расчет может быть использован для оценки возможного прогрессирующего обрушения зданий с применением изгибаемых трубобетонных элементов из круглых труб. Высокая степень деформирования изгибаемых элементов из трубобетона и их способность длительное время выдерживать нагрузку после начала разрушения (на стадии пластической работы трубобетонного элемента при достижении сталью трубы предела текучести, разрушении сжатого бетонного ядра) хорошо влияет на повышение общей живучести сооружения, что является обязательным требованием СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы»⁸ в части обеспечения прочности и устойчивости формы и положения остальных элементов при выходе из строя отдельных конструктивных элементов.

Заключение. На примере изгибаемых трубобетонных элементов из круглых труб продемонстрирована применимость нелинейного метода расчета для трубобетонных элементов с круглыми трубами для расчета изгибающего момента, соответствующего началу текучести стали трубы.

Предлагаемый подход к расчету основан на использовании полных диаграмм деформирования материалов и допущении о линейном распределении относительных деформаций трубы и бетона по поперечному сечению, что позволяет учесть пластическую работу под нагрузкой изгибаемых трубобетонных элементов, включая нисходящую ветвь диаграммы деформирования стали трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – № 4. – С. 75–80.
2. Дуванова И.А., Сальманов И.Д. Трубобетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 6(21). – С. 89–103.
3. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков и др. // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2015. – Т. 7, № 4. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf>. DOI: 10.15862/112TVN415.
4. Пенкина Е.В., Плотников А.И. К вопросу о применении трубобетонных колонн в многоэтажных и высотных зданиях // Междунар. молодежная науч. конф. по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых»: материалы и доклады: в 3 частях, Йошкар-Ола, 19–20 апр. 2013 г. / Поволжский государственный технологический университет. Том Часть 3. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2013. – С. 121–123.

⁸ СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. – Свод правил: издание официальное: утв. Министерством регионального развития Российской Федерации от 28 декабря 2010 г. № 822: дата введения 20 мая 2011 г. – URL: <http://www.consultant.ru>.

5. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 2. Расчет трубобетонных конструкций с металлической оболочкой / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков и др. // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2015. – Т. 7, № 4. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf>. DOI: 10.15862/112TVN415.
6. Несветаев Г.В., Резван И.В. Оценка прочности трубобетона // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 12-3. – С. 580–583.
7. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Трульв В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. – М.: Стройиздат, 1974. – 144 с.
8. Хазов П.А., Ситникова А.К., Чибаква Е.А. Расчет трубобетонных конструкций: современное состояние вопроса и перспективы дальнейших исследований (обзор) // Приволжский научный журнал. – 2023. – № 4(68). – С. 57–76.
9. Арленинов П.Д., Крылов С.Б., Смирнов П.П. Расчетно-экспериментальные исследования изгибаемых трубобетонных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 4. – С. 34–38.
10. Астанков К.Ю., Овчинников И.Г. Тенденции применения трубобетонных конструкций для строительства малых мостов // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России : Материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Волгоград, 19–21 мая 2021 г. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – С. 109–117.
11. Повышение нагрузочной способности трубобетонной балки / И.Г. Овчинников, Д.Н. Парышев, А.В. Ильяков и др. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2019. – № 4. – С. 58–66.
12. Якупова Л.З., Астанков К.Ю., Овчинников И.Г. О возможности применения свода правил СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» для проектирования трубобетонных конструкций в малом мостостроении // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – № 2. – С. 112–121.
13. Исследование напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов строительных конструкций из трубобетона / О.Е. Сысоев, С.В. Макаренко, А.Ю. Добрышкин и др. // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 94–99.
14. Deng Y.-Q., Huang Y., Young B. Design of concrete-filled high-strength steel RHS and SHS tubes under bending // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 320. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118891.
15. Попов И.П. Повышение несущей способности балки // Вестн. Инженерной школы Дальневосточного федерального ун-та. – 2024. – № 3(60). – С. 96–101. DOI: 10.24866/2227-6858/2024-3/96-101.
16. Стороженко Л.И., Ефименко В.И., Плахотный П.И. Изгибаемые трубобетонные конструкции. – Киев: Будівельник, 1993. – 104 с.
17. Упругопластическое деформирование сталебетонных балок с локальным смятием при трехточечном изгибе / П.А. Хазов, О.И. Ведяйкина, А.П. Помазов и др. // Проблемы прочности и пластичности. – 2024. – Т. 86, № 1. – С. 71–82. DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-1-71-82.
18. Инновационная трубобетонная балка для пролетных строений балочных малых мостов / О.Ю. Моисеев, Д.Н. Парышев, И.Г. Овчинников и др. // Инновационный транспорт. – 2016. – № 2(20). – С. 67–71. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-2-67-71.
19. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 9. – С. 1469–1483. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483.
20. Нелинейный расчет изгибаемых сталежелезобетонных элементов / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, А.М. Хаткевич и др. // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр.-во. Приклад. науки. – 2024. – № 2(37). – С. 9–23. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
21. Ведерникова А.А., Опбул Э.К. Расчет несущей способности внецентренно сжатых трубобетонных элементов с учетом нелинейных диаграмм материалов // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 1(84). – С. 36–45. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-36-45.
22. Хашхожев К.Н., Аваков А.А. Расчет центрально сжатых трубобетонных колонн кольцевого сечения с учетом физической нелинейности // Строительство и архитектура. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 14–18. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-14-18.
23. О работе сталежелезобетонных конструкций при внецентренном сжатии / Д.В. Конин, А.С. Крылов, Д.Н. Гаврилов и др. // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 12. – С. 31–37. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.31-37.
24. Кришан А.Л., Сагадатов А.И., Мельничук А.С. Реализация нелинейной деформационной модели при расчете прочности трубобетонных колонн // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2010. – № 10. – С. 635–643.
25. Определение напряженно-деформированного состояния коротких внецентренно-сжатых трубобетонных колонн методом конечных элементов путем сведения трехмерной задачи к двумерной / В.С. Чепурненко, Б.М. Языев, П.М. Урвачев и др. // Строительство и архитектура. – 2020. – Т. 8, № 4. – С. 87–94. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-87-94.
26. Кришан А.Л. Диаграммный расчет прочности трубобетонных колонн // Междунар. науч.-практ. конф. «Инженерные системы – 2011»: тез. докл., Москва, 05–08 апр. 2011 г. / Под общ. ред. С.Н. Кривошапко. – М.: Рос. ун-т дружбы народов, 2011. – С. 79.
27. Кришан А.Л., Трошкина Е.А., Кузьмин А.В. Предложения по расчету прочности трубобетонных колонн // Вестн. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2011. – № 1(33). – С. 66–69.
28. Ведерникова А.А. Совершенствование методики расчета трубобетонных элементов обратным численно-аналитическим методом и ее применение // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 11(107). – С. 437–449.
29. Snigireva V.A., Gorynin G.L. The nonlinear stress-strain state of the concrete-filled steel tube structures // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – 83(7). – P. 73–82. DOI: 10.18720/MCE.83.7.
30. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций: моногр. – Брест: БГТУ. – 2003. – 252 с.
31. Астанков К.Ю. Анализ современных подходов к проектированию и строительству арочных мостов с использованием трубобетона // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2023. – Т. 10, № 4. – DOI: 10.15862/11SAT5423.

REFERENCES

1. Krishan, A.L. (2009). Trubobetonnye kolonny dlya mnogoetazhnykh zdaniy [The concrete-filled steel tube columns for high-rise buildings]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]*, (4), 75–80. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Duvanov, I.A. & Sal'manov, I.D. (2014). Trubobetonnye kolonny v stroitel'stve vysotnykh zdaniy i sooruzhenii [Concrete-filled steel tube columns in construction high-rise building and structures]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii [Construction of Unique Buildings and Structures]*, 6(21), 89–103. (In Russ., abstr. in Engl.).

3. Ovchinnikov, I.I., Ovchinnikov, I.G., Chesnokov, G.V. & Mikhaldykin, E.S. (2015). O probleme rascheta trubobetonnykh konstrukttsii s obolochkoi iz raznykh materialov. Chast' 1. Opyt primeneniya trubobetona s metallicheskoj obolochkoi [About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 2. Calculation of tube-confined concrete structures with a metallic shell]. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*, 7(4). (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.15862/112TVN415.
4. Penkina, E.V. & Plotnikov, A.I. (2013). K voprosu o primeneniі trubobetonnykh kolonn v mnogoetazhnykh i vysotnykh zdaniyakh. *Mezhdunar. molodezhnaya nauch. konf. po estestvennonauchnym i tekhnicheskim distsiplinam «Nauchnomu progressu – tvorchestvo molodykh»*, v 3 chastyakh, Tom Chast' 3: materialy i doklady (121–123). Ioshkar-Ola: Povolzhskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet. (In Russ.).
5. Ovchinnikov, I.I., Ovchinnikov, I.G., Chesnokov, G.V. & Mikhaldykin, E.S. (2015). O probleme rascheta trubobetonnykh konstrukttsii s obolochkoi iz raznykh materialov. Chast' 2. Raschet trubobetonnykh konstrukttsii s metallicheskoj obolochkoi [About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 2. Calculation of tube-confined concrete structures with a metallic shell]. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*, 7(4). (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.15862/112TVN415.
6. Nesvetaev, G.V. & Rezvan, I.V. (2011). Otsenka prochnosti trubobetona. *Fundamental'nye issledovaniya*, (12-3), 580–583. (In Russ.).
7. Kikin, A.I., Sanzharovskii, R.S. & Trull', V.A. (1974). *Konstrukttsii iz stal'nykh trub, zapolnennykh betonom*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
8. Khazov, P.A., Sitnikova, A.K. & Chibakova, E.A. (2023). Raschet trubobetonnykh konstrukttsii: sovremennoe sostoyanie voprosa i perspektivy dal'neishikh issledovaniy (obzor). *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*, 4(68), 57–76. (In Russ.).
9. Arleninov, P.D., Krylov, S.B. & Smirnov, P.P. (2017). Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya izgibaemykh trubobetonnykh konstrukttsii. *Seismostoiikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, (4), 34–38. (In Russ.).
10. Astankov, K.Yu. & Ovchinnikov, I.G. (2021). Tendentsii primeneniya trubobetonnykh konstrukttsii dlya stroitel'stva mal'nykh mostov. *Molodezh' i nauchno-tekhnicheskii progress v dorozhnoi otarasli yuga Rossii: Materialy XV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* (109–117). Volgograd: Volgogradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. (In Russ.).
11. Ovchinnikov, I.G., Paryshev, D.N., Il'tyakov, A.V., Moiseev, O.Yu., Kharin, V.V., Popov, I.P. & Kharin, D.A. (2019). Povyshenie nagruzochnoi sposobnosti trubobetonnoi balki [Increasing the load capacity of a concrete beam]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya [Transport. Transport facilities. Ecology]*, (4), 58–66. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Yakupova, L.Z., Astankov, K.Yu., & Ovchinnikov, I.G. (2023). O vozmozhnosti primeneniya svoda pravil SP 266.1325800.2016 «Konstrukttsii stalezhelezobetonnye. Pravila proektirovaniya» dlya proektirovaniya trubobetonnykh konstrukttsii v malom mostostroenii [The code of norms SP 266.1325800.2016 «Composite steel and concrete structures. Design rules» applicability for the low-span bridges made of concrete-filled steel tubes design]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya [Transport. Transport facilities. Ecology]*, (2), 112–121. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Sysoev, O.E., Makarenko, S.V., Dobryshkin, A.Yu. & Kuznetsov, E.A. (2015). Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya izgibaemykh elementov stroitel'nykh konstrukttsii iz trubobetona. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 1(3), 94–99. (In Russ.).
14. Deng, Y.-Q., Huang, Y. & Young, B. (2024). Design of concrete-filled high-strength steel RHS and SHS tubes under bending. *Engineering Structures*, 320. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118891.
15. Popov, I.P. (2024). Povyshenie nesushchei sposobnosti balki [Increasing the load-bearing capacity of the beam]. *Vestn. Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo un-ta [FEFU: School of Engineering Bulletin]*, 3(60), 96–101. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.24866/2227-6858/2024-3/96-101.
16. Storozhenko, L.I., Efimenko, V.I. & Plakhotnyi, P.I. (1993). *Izgibaemye trubobetonnye konstrukttsii*. Kyiv: Budivelnik. (In Russ.).
17. Khazov, P.A., Vedyakina, O.I., Pomazov, A.P. & Kozhanov, D.A. (2024). Uprugoplasticheskoe deformirovanie stalebetonnykh balok s lokal'nym smyatiem pri trekhtochesnom izgibe [Elastic-plastic deformation of steel-concrete beams with local crumpling during three-point bending]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*, 86(1), 71–82. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-1-71-82.
18. Moiseev, O.Yu., Paryshev, D.N., Ovchinnikov, I.G., Kharin, V.V. & Ovchinnikov, I.I. (2016). Innovatsionnaya trubobetonnaya balka dlya proletnykh stroenii balochnykh mal'nykh mostov. *Innovatsionnyi transport*, 2(20), 67–71. (In Russ.). DOI: 10.20291/2311-164X-2016-2-67-71.
19. Lazovskii, D.N., Gil', A.I. & Glukhov, D.O. (2024). Deformatsionnyi podkhod k raschetu soprotivleniya szhatiyu stalezhelezobetonnykh elementov [Deformation approach to the calculation of compressive strength of steel-reinforced concrete elements]. *Vestnik MGSU*, 19(9), 1469–1483. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483.
20. Lazovskii, D.N., Glukhov, D.O., Khatkevich, A.M., Gil', A.I. & Chaparanganda, E. (2024). Nelineinyi raschet izgibaemykh stalezhelezobetonnykh elementov [Nonlinear calculation of bent steel-reinforced concrete elements]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 2(37), 9–23. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
21. Vedernikova, A.A. & Opubl, E.K. (2021). Raschet nesushchei sposobnosti vnetsentrenno szhatykh trubobetonnykh elementov s uchetom nelineinykh diagramm materialov [Bearing capacity calculation of eccentrically compressed concrete filled steel tube columns taking into account non-linear diagrams of materials]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 1(84), 36–45. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-36-45.
22. Khashkhozhiev, K.N. & Avakov, A.A. (2021). Raschet tsentral'no szhatykh trubobetonnykh kolonn kol'tseвого secheniya s uchetom fizicheskoi nelineinosti [Calculation of centrally compressed concrete filled steel tubular columns of annular section taking into account physical nonlinearity]. *Stroitel'stvo i arkhitektura [Construction and Architecture]*, 9(3), 14–18. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-14-18.
23. Konin, D.V., Krylov, A.S., Gavrilov, D.N., Zhdanova, A.A. & Voropaeva, M.I. (2023). O rabote stalezhelezobetonnykh konstrukttsii pri vnetsentrenno szhatii. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, (12), 31–37. (In Russ.). DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.31-37.
24. Krishan, A.L., Sagadatov, A.I. & Mel'nichuk, A.S. (2010). Realizatsiya nelineinoy deformatsionnoi modeli pri raschete prochnosti trubobetonnykh kolonn. *Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzhenii*, (10), 635–643. (In Russ.).
25. Chepurmenko, V.S., Yazyev, B.M., Urvachev, P.M. & Avakov, A.A. (2020). Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya korotkikh vnetsentrenno-szhatykh trubobetonnykh kolonn metodom konechnykh elementov putem svedeniya trekhmernoi zadachi k dvumernoi [Determination of stress-strain state of short eccentrically loaded concrete-filled steel tubular (CFST) columns using finite element method with reducing the problem from three-dimensional to two-dimensional]. *Stroitel'stvo i arkhitektura [Construction and Architecture]*, 8(4), 87–94. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-87-94.

26. Krishan, A.L. (2011). Diagrammnyi raschet prochnosti trubobetonnykh kolonn. In S.N. Krivoschapko (Eds.) *Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Inzhenernye sistemy – 2011»*: tez. dokl., Moskva, 05–08 apr. 2011 g. (79). Moscow: Ros. un-t druzhby narodov. (In Russ.).
27. Krishan, A.L., Troshkina, E.A. & Kuz'min, A.V. (2011). Predlozheniya po raschetu prochnosti trubobetonnykh kolonn. *Vestn. Magnitogorskogo gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova*, 1(33), 66–69. (In Russ.).
28. Vedernikova, A.A. (2023). Sovershenstvovanie metodiki rascheta trubobetonnykh elementov obratnym chislenno-analiticheskim metodom i ee primenenie. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 11(107), 437–449. (In Russ.).
29. Snigireva, V.A. & Gorynin, G.L. (2018). The nonlinear stress-strain state of the concrete-filled steel tube structures. *Magazine of Civil Engineering*, 83(7), 73–82. DOI: 10.18720/MCE.83.7
30. Tur, V.V. & Rak, N.A. (2003). *Prochnost' i deformatsii betona v raschetakh konstruksii: monogr.* Brest: BGTU. (In Russ.).
31. Astankov K.Yu. (2023). Analiz sovremennykh podkhodov k proektirovaniyu i stroitel'stvu arochnykh mostov s ispol'zovaniem trubobetona [Analysis of modern approaches to the design and construction of arch bridges using tube-reinforced concrete]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya» [Russian Journal of Transport Engineering]*, 10(4). (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.15862/11SATS423.

Поступила 25.10.2024

NONLINEAR CALCULATION OF TUBULAR CONCRETE ELEMENTS DURING BENDING

D. LAZOUSKI¹⁾, D. GLUKHOV²⁾, A. KALTUNOU³⁾, A. KHATKEVICH⁴⁾

(^{1), 3), 4)} Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, ²⁾ LLC «SoftClub», Minsk)

The question of the applicability of a nonlinear deformation model for the calculation of bent tubular concrete elements with round pipes is considered. A criterion for the destruction of a bent tubular concrete element without limiting concrete deformations during compression is proposed. The advantage of this failure criterion is the possibility of taking into account a high degree of redistribution of forces in the cross section of the bent tubular concrete element after the pipe steel reaches the yield strength and there is no need to normalize the ultimate compressibility of concrete. The results of the nonlinear calculation of the limiting force are compared with experimental data from the formed sample of studies. The applicability of the nonlinear calculation is confirmed, taking into account the authors' proposals for tubular concrete elements with round pipes during bending to calculate the moment corresponding to the beginning of the flow of pipe steel.

Keywords: pipe concrete element, nonlinear deformation model, deformation diagrams, fracture criterion.

УДК 622.691.4:004.4

DOI 10.52928/2070-1683-2024-38-3-12-18

**ПРЕДИКТИВНАЯ АНАЛИТИКА ОБЪЕКТОВ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ***д-р техн. наук, проф. В.Н. РОМАНЮК¹⁾,**канд. техн. наук, доц. А.М. НИЯКОВСКИЙ²⁾, Н.В. СТРУЦКИЙ³⁾**¹⁾ Белорусский национальный технический университет, Минск,**²⁾ Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,**³⁾ ГПО «Белтопгаз», Минск)**²⁾ ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5106-6278>*

В статье освещен опыт создания, применения и развития цифрового двойника газораспределительной системы Республики Беларусь. Показан эффект применения IT-технологий в сфере газоснабжения как неотъемлемой части общей инженерной инфраструктуры. Описаны принципы построения и функционирования имеющегося набора программных средств, обеспечивающих производственную деятельность газоснабжающих организаций и аппарата управления ГПО «Белтопгаз». Сформулированы научно-методические подходы к созданию инструментов предиктивной аналитики объектов газораспределительной системы Республики Беларусь.

Ключевые слова: инженерная инфраструктура, газораспределительная система, предиктивная аналитика, прогнозирование состояния, программное обеспечение, большие данные, цифровой двойник.

Введение. Стержневой, образующей основой жизненной среды является так называемая каркасная инфраструктура: социальная (объекты образования, здравоохранения, торговли, бытового обслуживания и т.п.) и инженерная (разнообразные коммуникации и технические системы).

В законодательстве Республики Беларусь определено, что инженерная инфраструктура представляет собой совокупность инженерных сетей, капитальных строений (зданий, сооружений), изолированных помещений и иных объектов, предназначенных, в частности, для подачи ресурсов на объекты потребления¹. Одной из важных составляющих инженерной инфраструктуры является газораспределительная система, обеспечивающая передачу газа непосредственно его потребителям в качестве топлива (энергоносителя) и для технологических целей.

По состоянию на 01.01.2024, уровень газификации в целом по Республике Беларусь составляет 83,4%. Потребителями газа являются 3,7 млн. газифицированных квартир, более 9 тыс. коммунально-бытовых организаций непроизводственного характера и 4 тыс. промышленных предприятий. Общая протяженность наружных распределительных газопроводов, находящихся на балансе газоснабжающих организаций, входящих в состав государственного производственного объединения (ГПО) «Белтопгаз», составляет 67,5 тыс. км.

Приведенные выше общие цифры наглядно характеризуют масштаб газового хозяйства Республики Беларусь, обеспечивающего полный спектр инфраструктурных услуг, включающий снабжение газом существующих потребителей, безопасную эксплуатацию объектов газораспределительной системы и газопотребления, развитие сети и подключение новых потребителей.

Осуществление данной деятельности, тем более в современных условиях, невозможно без соответствующей цифровой поддержки. К наиболее актуальным и востребованным инструментам цифровизации в настоящее время можно отнести технологию цифрового двойника (Digital Twin) – виртуальной цифровой модели существующего в реальности физического объекта или процесса, моделирующей внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях взаимодействия помех и окружающей среды². В этой связи создание цифрового двойника газораспределительной системы является одним из приоритетных направлений деятельности ГПО «Белтопгаз» и представляет собой актуальную научно-исследовательскую задачу.

Вместе с тем все более востребованной становится задача прогнозирования поведения и состояния объектов инженерной инфраструктуры с использованием методологии предиктивной (прогнозной) аналитики (Predictive Analytics), основывающейся на информации о текущем состоянии объекта и использующей накопленные статистические данные (Big Data) и предписанные правила их интерпретации (Machine learning) [1; 2].

Цель данной работы – описать текущее состояние «цифровизации» объектов системы газораспределения и газопотребления Республики Беларусь и сформулировать основные научно-методологические подходы к созданию инструментария предиктивной аналитики в данной отрасли инженерной инфраструктуры.

Объект исследования – система газораспределения и газопотребления природного газа.

Предмет исследования – использование цифровых инструментов и информационных технологий при проектировании и эксплуатации объектов системы газораспределения для повышения надежности.

¹ Об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности в Республике Беларусь. Закон Респ. Беларусь, 5 июля 2004 г., № 300-З // ЭТАЛОН-ONLINE [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2006–2024. – URL: https://etalonline.by/document/?regnum=h10400300&q_id=11541704.

² СТБ 2583-2020. Цифровая трансформация. Термины и определения. – Введ. 01.03.21. – Минск: Госстандарт, 2020. – 16 с.

Основная часть. Стратегия цифровизации газораспределительной отрасли ГПО «Белтопгаз» предполагает отказ от выборочной автоматизации отдельных технологических и бизнес-процессов в пользу создания единой отраслевой автоматизированной среды (рисунок 1), основу которой составляют три взаимосвязанных мультипрограммных комплекса (МПК):

- «Мириада» (набор мобильных приложений для цифрового сопровождения непосредственно производителей работ);
- «Панорама» (центральный комплекс, обеспечивающий консолидацию всего массива «больших данных» (Big Data), образующегося внутри газораспределительной системы, и обеспечивающий визуализацию системы во всей ее совокупности);
- «Вершина» (информационно-справочная надстройка верхнего уровня) [3].



Рисунок 1. – Трехуровневая автоматизированная система ГПО «Белтопгаз»

МПК «Панорама» включает в себя общую электронную карту с нанесенными объектами газораспределительной системы и смежных инженерно-технических коммуникаций (в необходимом объеме), а также набор специализированных программных модулей (ПМ) под различные виды эксплуатационной деятельности. Электронная карта реализована на основе открытой технологии OpenStreetMap, графические элементы карты и соответствующие разделы программных модулей информационно связаны.

В настоящее время МПК «Панорама» включает в себя следующие программные модули:

- «Наружные сети»;
- «Узлы редуцирования газа»;
- «Электрохимическая защита»;
- «Гидравлический (поверочный) расчет»;
- «Аварийная ситуация».

Непосредственно к МПК «Панорама» примыкают еще два программных продукта, обеспечивающие цифровое сопровождение бизнес-процессов, осуществляемых на этапах проектирования и строительства объектов газораспределения и газопотребления: «Технические условия» и «ОКС. Инвестиции». Таким образом, МПК «Панорама» имеет блочно-модульную структуру, представленную на рисунке 2.

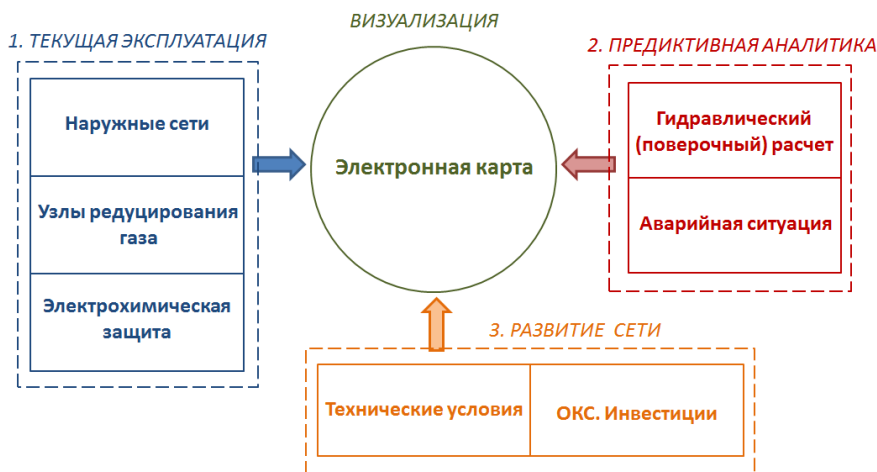


Рисунок 2. – Блочная-модульная структура МПК «Панорама»

Программные модули, входящие в блок текущей эксплуатации, как понятно из их названий, объединяют в себе информацию об основных подсистемах, непосредственно составляющих газораспределительную систему:

- трубопроводах, по которым непосредственно происходит распределение газа, с сетевыми сооружениями на них (запорными устройствами, компенсаторами, контрольно-измерительными пунктами (КИП), контрольными трубками и т.д.);
- газорегуляторных пунктах (ГРП), в том числе шкафных (ШРП), газорегуляторных установках (ГРУ), а также отдельно стоящих комбинированных регуляторах (КРД), поддерживающих устойчивый режим давления газа на всем протяжении трубопроводной сети и входах к потребителям;
- средствах ЭХЗ, обеспечивающих защиту стальных подземных газопроводов от коррозии.

Именно с разработки первых версий данных модулей и электронной карты МПК «Панорама» началась активная цифровизация отрасли, ее первоочередной задачей являлось удовлетворение возникшего запроса от основных производственных служб газоснабжающих организаций на внедрение IT-технологий в собственную деятельность. Ключевой особенностью разработки являлась глубокая координация специалистов газоснабжающих организаций и аппарата управления ГПО «Белтопгаз», разработчиков и пользователей программного продукта в рамках постоянно действующих рабочих групп. В конечном итоге, были сформированы общие требования к функционалу программных модулей, включающему пять основных функций:

- 1) учет и каталогизация эксплуатируемых сооружений и технических средств (управление базами данных);
- 2) хранение цифровых копий документации, графических изображений и фотоматериалов (электронный архив);
- 3) разработка графиков и планов проведения работ (планировщик заданий);
- 4) регистрация выполненных работ (журнал событий);
- 5) формирование стандартных выходных форм эксплуатационных документов и передача их по назначению (электронный документооборот).

Кроме технологических и бизнес-процессов, целиком замкнутых в границах организационной структуры газового хозяйства, программные возможности позволяют осуществлять и цифровое сопровождение производственной деятельности, связанной с взаимодействием со сторонними организациями. В частности, в рамках ПМ «Наружные сети» реализованы процессы выдачи строительным организациям разрешений на право производства ремонтных, строительных и земляных работ в охранной зоне объектов газораспределительной системы, а также на право контроля над раскопками (рисунок 3).

Земляные работы на газопроводе									
23	г-л НД Победа	Подразделение	Номер	Дата выдачи	Срок действия		Разрешение выдано	Адрес работ	Вид работ
					с	по			
24	г-л НД г. Волк	Волковскгаз	1	17.01.2023	17.01.2023	28.04.2023	Филиал № 6 открытого акционерного общества "БЕЛСВЯЗСТРОЙ"	г. Волковск, пер. Зои Космодемьянской	Земляные работы
25	г-л СД ул. Рок	Волковскгаз	63	14.07.2022	18.07.2022	22.09.2022	Литвинов В.А.	г. Волковск, ул. Кузнецова, д.13	Прокладка газопровода ввода
26	г-л СД Пролет	Найдено : 2							
		<< < 1 > >>							
28	г-л СД по ул. Зои Космодемьянской г. Волковск	15.10.1966		15.10.1966	Региневич Евгений Сергеевич	20	4	ПУ "Волковскгаз"	СД сталь 89
Итого									
Газопровод Разбивка на маршруты Сведения о работах Выявленные повреждения Земляные работы									

Рисунок 3. – Фрагмент рабочего окна ПМ «Наружные сети»

Также в указанные выше программные модули поступают данные удаленного мониторинга технологических параметров, оснащенных средствами телемеханики объектов газораспределительной системы от SCADA-систем диспетчерского контроля и управления. В первую очередь, это 2,5 тыс. телемеханизированных ГРП (100% от общего количества) и 4,2 тыс. ШРП (72,6%). Дистанционный контроль узлов редуцирования газа дает полную картину входных и выходных давлений газа, состояния внутренних помещений и оборудования, позволяет оперативно принимать меры в случае возникновения сбоев в работе, других нештатных ситуаций. Тем самым обеспечивается высокая надежность, стабильность и бесперебойность газоснабжения.

Одна из основных причин потери работоспособности (отказов) для большинства стальных подземных коммуникаций – коррозионные повреждения, соответственно, важной областью применения систем телемеханики является электрохимическая защита от коррозии. В системе ГПО «Белтопгаз» эксплуатируются около 4,9 телемеханизированных установок ЭХЗ, что составляет 91,1% от их общего числа. Дистанционно контролируются и управляются выходные ток и напряжение, защитный потенциал в точке подключения установки к трубопроводу. Автоматически осуществляется внутренняя самодиагностика средств защиты: время наработки и величина электропотребления, целостность силовых и соединительных кабелей.

В дополнение к телемеханизации основных технологических объектов системы газораспределения (ГРП, ШРП, станций катодной защиты) широкое применение находит установка датчиков (индикаторов) с функцией дистанционной передачи данных непосредственно на линейной части газовой сети. Контролируемыми параметрами, как правило, являются давление газа, защитный электрический потенциал, иногда скорость коррозии. В местах пересечения газопроводов с категорийными автодорогами и железными дорогами, где масштаб последствий от аварийного выхода газа может быть особенно велик, ведется контроль загазованности.

На электронную карту передается информация от системы мониторинга перемещения транспортных средств, что позволяет в режиме реального времени отслеживать передвижение специального автотранспорта.

Таким образом, внутри МПК «Панорама» происходит непрерывное обращение и накопление гигантского объема разнородной информации из реляционных баз данных программных модулей, SKADA-систем, показаний датчиков и приборов учета газа, журналов веб-серверов, а также различных изображений – сканов документов, фотографий выявленных неисправностей и дефектов, необработанных бинарных файлов и т.д. Образуется так называемое «озеро данных» (Data Lake) [4].

Озеро данных обеспечивает широкий выбор исходной информации для анализа и прогноза, однако само по себе не обладает соответствующими возможностями. Данные функции реализованы в программных модулях «Аварийная ситуация» и «Гидравлический (поверочный) расчет». Так, ПМ «Аварийная ситуация» предназначен для моделирования ситуаций, возникающих при внезапных отказах элементов сети, вызванных потерей герметичности газопроводов или сетевых устройств, связанных с возможностью выхода газа и требующих срочных мер по устранению (рис. 4).

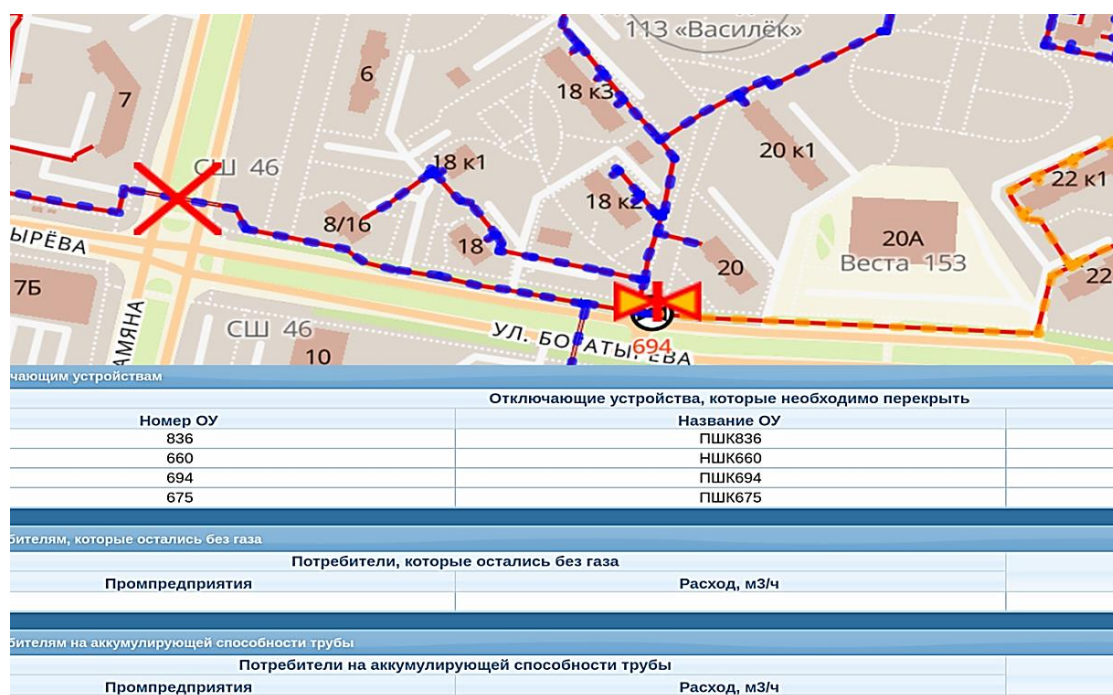


Рисунок 4. – Фрагмент рабочего окна ПМ «Аварийная ситуация»

Программный модуль позволяет оценить возможные последствия сложившейся ситуации и подсказать необходимые действия по ее локализации. Так, автоматически определяются запорные устройства, которые нужно отключить для изоляции поврежденного участка и связанных с ним газопроводов от газораспределительной сети, чем минимизируются потери газа и создаются условия для проведения ремонтных работ. Автоматически создается категоризованный список присоединенных потребителей – тех, которые могут быть временно отключены, и тех, прекращение газоснабжения которых крайне нежелательно: население, объекты жизнеобеспечения и предприятия непрерывного технологического цикла. Также рассчитываются аккумулирующая способность аварийного сегмента сети и период времени, на протяжении которого можно поддерживать газоснабжение потребителей на запасе оставшегося в трубопроводах газа (или, следуя профессиональной терминологии, «баллоне»).

Программный модуль «Аварийная ситуация» применяется как при локализации и ликвидации реальных аварий и инцидентов на объектах газораспределительной системы, так и при тренинге и обучении персонала специализированных подразделений газоснабжающих организаций. Возможно использование данного приложения при проведении ремонтных работ на объектах газотранспортной системы (ГРС, газопроводах-отводах), непосредственно влияющих на режим функционирования присоединенных распределительных сетей.

В рамках ПМ «Гидравлический (поверочный) расчет» моделируется гидравлический режим внутри газовой сети с учетом различных перспективных вариантов ее развития и подключения новых потребителей.

Использование данного инновационного программного продукта позволило повысить компетенции технических специалистов и руководителей газоснабжающих организаций, своевременно планировать пересмотр схем газоснабжения и повысить качество подготовки технических условий на подключение к газораспределительной системе [5]. Технические условия – документ, содержащий информацию о подключении здания, сооружения к объектам инженерной инфраструктуры³. Технические условия относятся к разрешительной документации на проектирование и строительство и содержат первичные параметры объекта газопотребления: месторасположение и точку подключения; характер (производственный, коммунально-бытовой, жилой); назначение используемого газа (отопление, пищеприготовление, технология); максимальный объем газопотребления. Программный комплекс «Технические условия» обеспечивает сопровождение полного цикла установленной законодательством и локальными нормативными актами процедуры, начиная от приема заявлений населения и заявок юридических лиц на присоединение к газораспределительной сети и заканчивая регистрацией выданных технических условий.

На стадии выдачи технических условий формируется коллективная потребность перспективных потребителей в газе и, следовательно, возникает возможность (и необходимость) проработки оптимальных решений по дальнейшему развитию газораспределительной сети. В этих целях на электронной карте МПК «Панорама» предусмотрен специально созданный слой (рисунок 5), на котором визуализирована вся имеющаяся информация о перспективных потребителях и предполагаемых новых участках газопроводов – подводящих, переключающих и кольцуемых, а также лупингах и перекладках, увеличивающих пропускную способность сети.

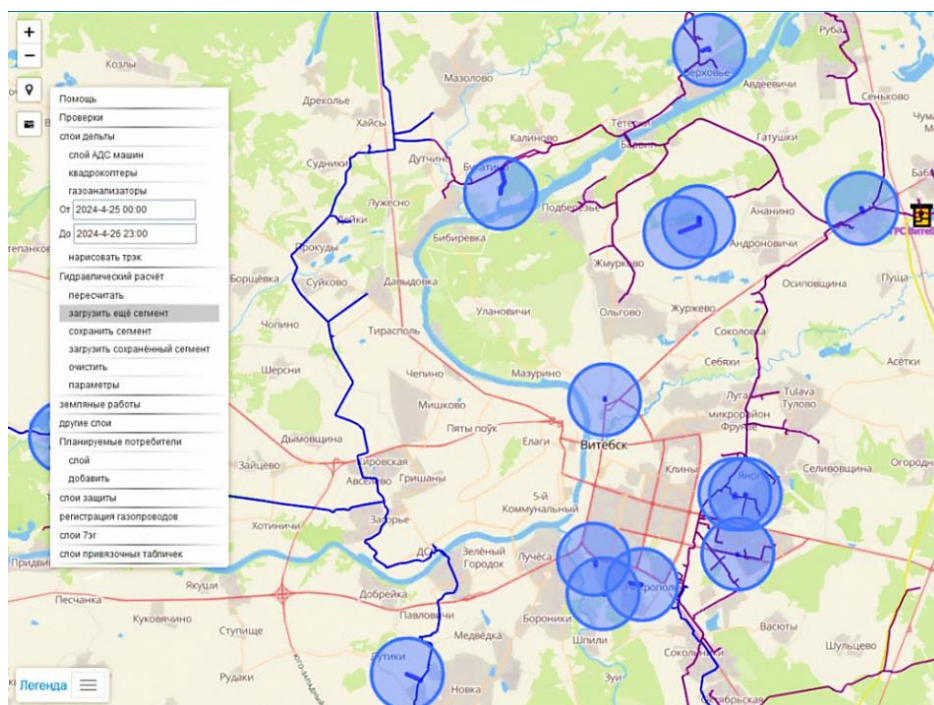


Рисунок 5. – Фрагмент электронной карты МПК «Панорама» с перспективными потребителями

Данные объекты по мере реализации инвестиционного цикла последовательно меняют свой статус на «проектируемый», «строящийся» (на данном этапе информация об объекте обрабатывается уже в рамках программного комплекса «ОКС. Инвестиции»), а по его завершении (после приемки в эксплуатацию) попадают в основную базу данных программных модулей «Наружные сети», «Узлы редуцирования газа», «Электрохимическая защита». Здесь же регистрируется информация о заключении договоров на газоснабжение, на техническое обслуживание и ремонт газового оборудования, вводных и внутренних газопроводов с потребителями.

Таким образом, формируется общее цифровое пространство, в котором свое отражение находит вся последовательность взаимосвязанных технологических и бизнес-процессов, составляющих область деятельности газоснабжающих организаций объединения. Уже сейчас очевиден ряд положительных эффектов цифровизации: прозрачность производственных активов и материально-технического обеспечения, повышение уровня планирования, административно-производственного контроля и исполнительской дисциплины, обеспечение полноты и качества эксплуатационных и отчетных данных, упрощение и сокращение документооборота.

³ Положение о порядке подготовки и выдачи разрешительной документации на строительство объектов, утв. постановлением Совета Министров Республики Беларусь 20.02.2007 № 223 (в редакции постановления Совета Министров Республики Беларусь 31.10.2018 № 785) // ЭТАЛОН-ONLINE [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2006-2024. – URL: https://etalonline.by/document/?regnum=c20700223&q_id=11550351.

Вместе с тем, если говорить о таких целевых аспектах использования технологии среды цифровых двойников (Digital Twin Environment – DTE), как наблюдение (запрос текущего и прошлых состояний физического объекта) и прогнозирование (предсказание будущего состояния физического объекта) [6], то предиктивная функция в созданной цифровой системе выражена пока еще недостаточно. Такая ситуация, с одной стороны, имеет объективные предпосылки, так как прогнозирование само по себе является гораздо более сложной, интеллектуально емкой задачей по сравнению с наблюдением, тем более в условиях такой сложно формализуемой системы, как газораспределительная. С другой – требует принятия соответствующих организационных и технических решений для своего качественного изменения.

Первым шагом к внедрению инструментов предиктивной аналитики является наполнение и структурирование существующих баз данных (Big Data) всеми необходимыми признаками, учитывающими состояние объектов и элементов газораспределительной системы: способ прокладки, место прокладки, материал изготовления трубопроводов, год строительства, характеристики грунта, наличие источников блуждающих токов, диаметры участков трубопроводов, давление газа, статистика и характер отказов и т.д.

Вторым шагом к внедрению указанного инструментария должно стать формирование механизмов искусственного интеллекта, алгоритмов его функционирования.

Заключение. Оценивая уровень цифрового развития применительно к газораспределительной системе Республики Беларусь, можно сделать следующие выводы.

1. В Республике Беларусь создан агрегированный цифровой двойник инженерной инфраструктуры системы газораспределения и газопотребления.

2. Разработана и реализована оригинальная архитектура построения отраслевого цифрового двойника, являющегося внутренним продуктом ГПО «Белтопгаз». Ядром цифрового двойника является мультипрограммный комплекс (МПК) «Панорама», включающий в себя набор специализированных программных модулей для цифровой поддержки основных производственных служб газоснабжающих организаций и электронную карту сетей газораспределения. Непосредственно к МПК «Панорама» примыкают взаимосвязанные с ним комплексы «Мириада» и «Вершина» – наборы мобильных приложений для линейного персонала и справочно-информационных панелей (дашбордов) для руководителей. Подобный подход позволил охватить все организационные и технологические уровни сложнейшего производственного комплекса и в целом повысить его управляемость.

3. В то же время, с учетом растущих возможностей современных программно-технических средств, в частности, в области удаленного мониторинга объектов газораспределительной системы и обработки накопленных баз данных о состоянии системы, потенциал технологии цифрового двойника требует дальнейшего освоения в части повышения эффективности использования, получаемой отдачи, достижения функционального баланса за счет увеличения доли предиктивно-аналитической составляющей. Подробному рассмотрению возможных перспектив дальнейшего развития отраслевого цифрового двойника ГПО «Белтопгаз» будет посвящена отдельная статья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Roberty E.A.M. Predictive Analytics Applications for Oil and Gas Processing Facilities [Electronic resource] // Massachusetts Institute of Technology. – Massachusetts: MIT, 2021. – 89 p. – Mode of access: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/140083/machadoroberty-emachado-sm-sdm-2021-thesis.pdf?sequence=1>. – Date of access: 11.08.2024.
2. Welland C. Predictive Analytics in 2024: Definition, Benefits, Use Cases and Tools [Electronic resource] // Medium. – Mode of access: <https://medium.com/piexchange/predictive-analytics-3260e7fe4596>. – Date of access: 11.08.2024.
3. Струцкий Н.В., Васильев В.Ю. Единая автоматизированная система ГПО «Белтопгаз». От идеи к результату // Энергетическая стратегия. – 2017. – № 3(57). – С. 52–54.
4. Рындина С.В. Технологии анализа больших данных (продвинутый уровень): управление и руководство данными, хранение и обработка данных: учеб.-метод. пособие. – Пенза: ПГУ, 2023. – 48 с.
5. Принципы построения, возможности и опыт апробации программного модуля «Гидравлический (поверочный) расчет газопроводов» / Н.В. Струцкий, С.И. Морозов, О.В. Голубева и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – № 2. – С. 66–69. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-48-2-66-69.
6. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems [Электронный ресурс] // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems / ed.: F.J. Kahlen, S. Flumerfelt, A.C. Alves. – Switzerland: Springer, 2017. – P. 85–113. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/306223791>. – Date of access: 02.08.2024. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.

REFERENCES

1. Roberty, E.A.M. (2021). *Predictive Analytics Applications for Oil and Gas Processing Facilities*. Massachusetts: MIT. URL: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/140083/machadoroberty-emachado-sm-sdm-2021-thesis.pdf?sequence=1>.
2. Welland, C. (2023). Predictive Analytics in 2024: Definition, Benefits, Use Cases and Tools. *Medium*. URL: <https://medium.com/piexchange/predictive-analytics-3260e7fe4596>.
3. Strutskii, N.V. & Vasil'ev, V.Yu. (2017). *Edinaya avtomatizirovannaya sistema GPO «Beltopgaz»*. Ot idei k rezul'tatu. *Energeticheskaya strategiya*, 3(57), 52–54. (In Russ.).
4. Ryndina, S.V. (2023). *Tekhnologii analiza bol'shikh dannykh (prodvinutyi uroven'): upravlenie i rukovodstvo dannyimi, khranenie i obrabotka dannykh: ucheb.-metod. posobie*. Penza: PGU. (In Russ.).

5. Strutskii, N.V., Morozov, S.I., Golubeva, O.V., Boslovyak, S.V. & Yanushonok, A.N. (2023). Printsipy postroeniya, vozmozhnosti i opyt aprobatsii programmogo modulya «Gidravlicheskiy (poverochnyi) raschet gazoprovodov» [Principles of construction, possibilities and experience of testing the software module "Hydraulic (verification) calculation of gas pipelines"]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. B, Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied sciences], (2), 66–69. (In Russ, abstr. in Engl.). DOI: 10.52928/2070-1616-2023-48-2-66-69.
6. Grieves, M. & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In F.J. Kahlen (Eds.), S. Flumerfelt (Eds.), & A.C. Alves (Eds.) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (85–113). Switzerland: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.

Поступила 21.09.2024

PREDICTIVE ANALYTICS OF THE OBJECTS OF THE GAS DISTRIBUTION SYSTEM OF THE REPUBLIC OF BELARUS: CURRENT STATUS AND PROSPECTS

V. ROMANIUK¹⁾, A. NIYAKOVSKII²⁾, N. STRUTSKY³⁾

¹⁾ *Belarusian National Technical University, Minsk,*

²⁾ *Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,*

³⁾ *Beltopgaz SPA, Minsk)*

The article highlights the experience of creating, applying and developing a digital twin of the gas distribution system of the Republic of Belarus. The effect of using IT technologies in the field of gas supply as an integral part of the overall engineering infrastructure of the country is shown. The principles of the construction and functioning of the existing set of software tools that ensure the production activities of gas supply organizations and the management apparatus of GPO "Beltopgaz" are described. Scientific and methodological approaches to the creation of predictive analytics tools for objects of the gas distribution system of the Republic of Belarus are formulated.

Keywords: *engineering infrastructure, gas distribution system, predictive analytics, condition forecasting, software, big data, digital twin.*

УДК 691.32:624.012.45/.46

DOI 10.52928/2070-1683-2024-38-3-19-27

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ НАЧАЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНОВ КЛАССОВ ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ $C^{12}/_{15}...C^{50}/_{60}$

канд. техн. наук, доц. А.А. ВАСИЛЬЕВ, Ю.К. КАБЫШЕВА, М.И. ТКАЧЕВА
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

В статье обоснована необходимость исследования начальной карбонизации бетона. На основании лабораторных исследований образцов бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}...C^{50}/_{60}$, составов смесей марки по удобоукладываемости П1 ($ОК = 4$ см) получена система расчетно-экспериментальных зависимостей начальной карбонизации $KC_0 = f(I)$. Выполнена проверка зависимостей методами математической статистики, показавшая адекватность полученных зависимостей.

Получены зависимости начальной карбонизации $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ от гарантированной прочности бетона на сжатие для смесей марки по удобоукладываемости П1.

Путем математической обработки коэффициентов полученных выражений выведены зависимости начальной карбонизации $KC_0 = f(I_p)$ и $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}...C^{50}/_{60}$, составов смесей марок по удобоукладываемости Ж1 (8 с) и Ж2 (15 с).

Ключевые слова: бетон, карбонизация, карбонатная составляющая, начальная карбонизация бетона.

Введение. Карбонизация бетона – основной вид его коррозии в любых воздушных средах [1]. Разработка (построение) модели карбонизации, адекватно описывающей (определяющей) ее развитие во времени по сечению бетона для любых эксплуатационных условий – одна из важнейших задач долговечности бетона и, в первую очередь, железобетона [2].

Существующие методы оценки (прогнозирования) карбонизации бетона базируются на фенолфталеиновом тесте (ФФТ) [3–12]. На его основе, соответственно, созданы различные модели карбонизации бетона. Наиболее известна сегодня в Европе модель, разработанная Пападакисом [4], учитывающая 11 параметров. Однако, на наш взгляд, наиболее объективной (с учетом того, что она базируется на ФФТ) является модель, разработанная профессором В.В. Бабицким¹. Все модели в зависимости от различных параметров (окружающей среды, состава бетона и т.д.) позволяют условно прогнозировать карбонизацию. Условно, потому что зона перемещения слоя резкого изменения окраски происходит при значении $pH \approx 10,3$ (а при карбонизации бетона значения pH водной вытяжки цементного камня изменяются на практике, как минимум, в пределах 13,2...8,4), и ФФТ является частным случаем оценки и прогнозирования карбонизации [2].

Необходимо отметить, что все модели не учитывают начальную карбонизацию бетона, а еще в начале двухтысячных годов профессор И.А. Кудрявцев и доцент В.П. Богданов в своих исследованиях показали, что уже на стадии перемешивания бетонной смеси карбонизация достигает весомых значений. Справедливости ради необходимо отметить, что оценка карбонизации ФФТ и не дает возможности (практически) учитывать начальную карбонизацию бетона.

Доцентом А.А. Васильевым по результатам многолетних исследований параметров карбонизации (реакции, механизма, изменения во времени по сечению бетона в различных эксплуатационных условиях) показано и полностью доказано, что существующие методы исследования карбонизации бетона не позволяют ни оценивать, ни тем более прогнозировать карбонизацию бетона [1; 2]. Соответственно, они не дают возможность оценивать начальную карбонизацию бетона (сразу после его изготовления), оказывающую значительное влияние на ход развития карбонизации и ее абсолютные значения [2].

Карбонизация бетона сегодня оценивается показателем «степень карбонизации», определяющим количество поглощенного углекислого газа воздуха. Таким образом, она оценивается косвенно (не по количеству образовавшихся карбонатов), кроме того, трудно (скорее невозможно) найти еще направление науки, в котором степень определяется количеством. Не говоря уже о том, что отсутствуют количественные и качественные критерии оценки количества поглощенного углекислого газа воздуха.

Карбонизацию необходимо исследовать на основе определения количества образующихся карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона, что абсолютно логично [1]. Такой подход позволяет оценивать карбонизацию количественно и качественно в любом сечении бетона и на любом временном отрезке ее развития. Получение системы расчетно-экспериментальных зависимостей развития карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие для разных эксплуатационных условий является базой для создания фактической модели карбонизации. Исследование карбонизации для создания расчетно-экспериментальной

¹ Бабицкий В.В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / БНТУ. – Минск, 2005. – 540 л.

модели развития карбонизации во времени по сечению бетонов необходимо выполнять в несколько этапов. Первым из них является исследование изменения карбонизации по сечению бетонов различных составов для основных классов по прочности на сжатие сразу после изготовления бетона (начальной карбонизации). Вторым этап – получение регрессионных зависимостей развития карбонизации во времени по сечению бетонов основных классов по прочности на сжатие для различных эксплуатационных условий [2].

Основная часть. Карбонизацию бетона исследовали на основе определения карбонатной составляющей (показателя K_{C_0}) цементно-песчаной фракции бетона сразу после его изготовления с применением тепловлажностной обработки (ТВО).

Показатель K_{C_0} получали объемно-газовым методом (экспресс-метод определения показателя K_{C_0} приведен в [13]). Статистическую обработку экспериментальных данных производили при помощи табличного процессора «Excel».

Для определения показателя K_{C_0} исследовали кубики размером $100 \times 100 \times 100$ мм, выполненные в заводских условиях из бетонов основных классов по прочности на сжатие $C^{12}_{/15}$, $C^{16}_{/20}$, $C^{18}_{/22,5}$, $C^{20}_{/25}$, $C^{22}_{/27,5}$, $C^{25}_{/30}$, $C^{28}_{/35}$, $C^{30}_{/37}$, $C^{32}_{/40}$, $C^{35}_{/45}$, $C^{40}_{/50}$, $C^{45}_{/55}$ и $C^{50}_{/60}$.

Поскольку у бетона любого класса по прочности на сжатие значения количества использованного цемента для составов марок по удобоукладываемости П1...П5 отличаются до 35%, марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4 – до 18% [14], при прогнозировании начальной карбонизации (показателя K_{C_0}) целесообразно использовать расчетные значения использованного цемента (Π_p) в зависимости от массовости применения бетонов в железобетонных элементах (ЖБЭ) и конструкциях (ЖБК). Так, поскольку для наиболее часто выпускаемых ЖБЭ используют смеси марок по удобоукладываемости П1 (ОК = 1...4 см), Ж1 (5–10 с) и Ж2 (11–20 с), целесообразно принимать Π_p для смесей П1 (ОК = 4 см), Ж1 – (7 с), Ж2 – (15 с).

При выборе составов учитывались требования² в части рекомендуемых: марок цемента, количества цемента и параметров бетонной смеси для различных типов ЖБЭ.

Для изготовления кубиков использовали цемент М500 активностью 28–32 МПа. При расчете составов бетона применялся вычислительный комплекс «Технолог», основанный на многофакторном методе подбора состава бетона, разработанном профессором В.В. Бабицким.

Составы бетона для наиболее часто применяемой отпускной прочности бетона (70%) приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Составы образцов бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	В/Ц	Осадка конуса, см	Состав смеси, кг/м ³			
			Ц	П	Щ	В
$C^{12}_{/15}$	0,866	4	213	827	1154	184
$C^{16}_{/20}$	0,666		275	766	1164	183
$C^{18}_{/22,5}$	0,599		305	741	1165	183
$C^{20}_{/25}$	0,546		334	718	1163	182
$C^{22}_{/27,5}$	0,502		364	695	1158	183
$C^{25}_{/30}$	0,466		397	670	1149	185
$C^{28}_{/35}$	0,409		465	624	1126	190
$C^{30}_{/37}$	0,391		490	608	1116	192
$C^{32}_{/40}$	0,366		529	584	1099	194
$C^{35}_{/45}$	0,334		592	548	1070	198
$C^{40}_{/50}$	0,307		654	517	1039	201
$C^{45}_{/55}$	0,286		714	488	1006	205
$C^{50}_{/60}$	0,268		774	462	973	208

Примечание. В/Ц – водоцементное отношение; Ц, П, Щ, В – массы цемента, песка, щебня, воды, добавки, кг.

После изготовления кубики подвергали ТВО по стандартному режиму. Для каждого состава бетона на определенный класс по прочности на сжатие исследовали по 2 кубика. Образцы бетона отбирали по двум противоположным граням кубиков.

Отбор образцов бетона, приготовление проб и определение карбонатной составляющей (показателя K_{C_0}) выполняли в соответствии с методиками [2].

Значения K_{C_0} определяли по сечению кубиков с шагом 2,5 мм. Так как в процессе эксплуатации ЖБЭ (ЖБК) в любых воздушных средах в поверхностном слое бетона под воздействием кислых газов происходит разложение образовавшихся карбонатов, в расчетно-экспериментальных зависимостях изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетона в различных эксплуатационных условиях фактические значения карбонатной составляющей на поверхности бетона будут значительно отличаться от прогнозных. Для учета вышеприведенного за начальное значение K_{C_0} принимали глубину сечения бетона 2,5 мм.

² СТБ 1544-2005. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия. – Введ. 01.07.2005. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2005. – 17 с.

Для каждого сечения (2,5–25 мм) был получен набор значений показателя KC_0 (по 10 значений с учетом отбраковки с погрешностью более 8% – удвоенной погрешности приготовления образцов цементно-песчаной фракции бетона). По полученным значениям KC_0 были построены усредненные экспериментальные регрессионные зависимости $l-KC_0$ для каждого класса бетона по прочности на сжатие составов с ОК = 4 см.

Так, зависимость $l-KC_0$ для класса бетона по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ (бетона, массово применяемого для изготовления массивных ЖБЭ – колонн) приведена на рисунке 1.

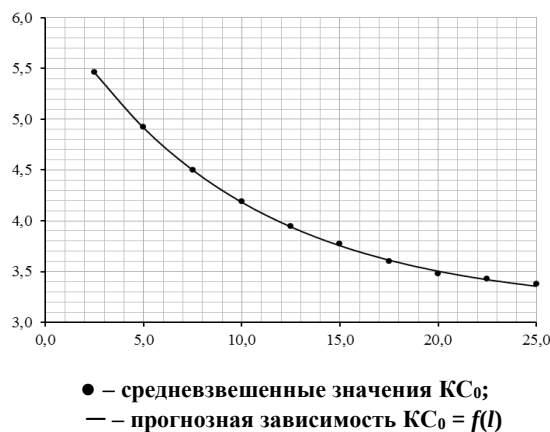


Рисунок 1. – Гистограмма остатков с нанесенной функцией плотности нормального распределения для сечений

Проверка значимости регрессионной модели для каждого класса бетона по прочности на сжатие выполнялась методами математической статистики. По полученным экспериментальным значениям KC_0 для всех классов бетона по прочности на сжатие с шагом 2,5 мм (по сечению 2,5...25 мм) строились гистограммы остатков. Для доказательства того, что неучитываемые в модели факторы взаимно компенсируются и среди них нет значимо влияющих (помимо уже учтенных), проверялась гипотеза о нормальном распределении остатков с нулевым математическим ожиданием.

На рисунках 2 и 3 и в таблице 2 представлена, соответственно, оценка значимости регрессионной модели $l-KC_0$ для сечений 5,0 и 20 мм бетона класса по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ с ОК = 4 см.

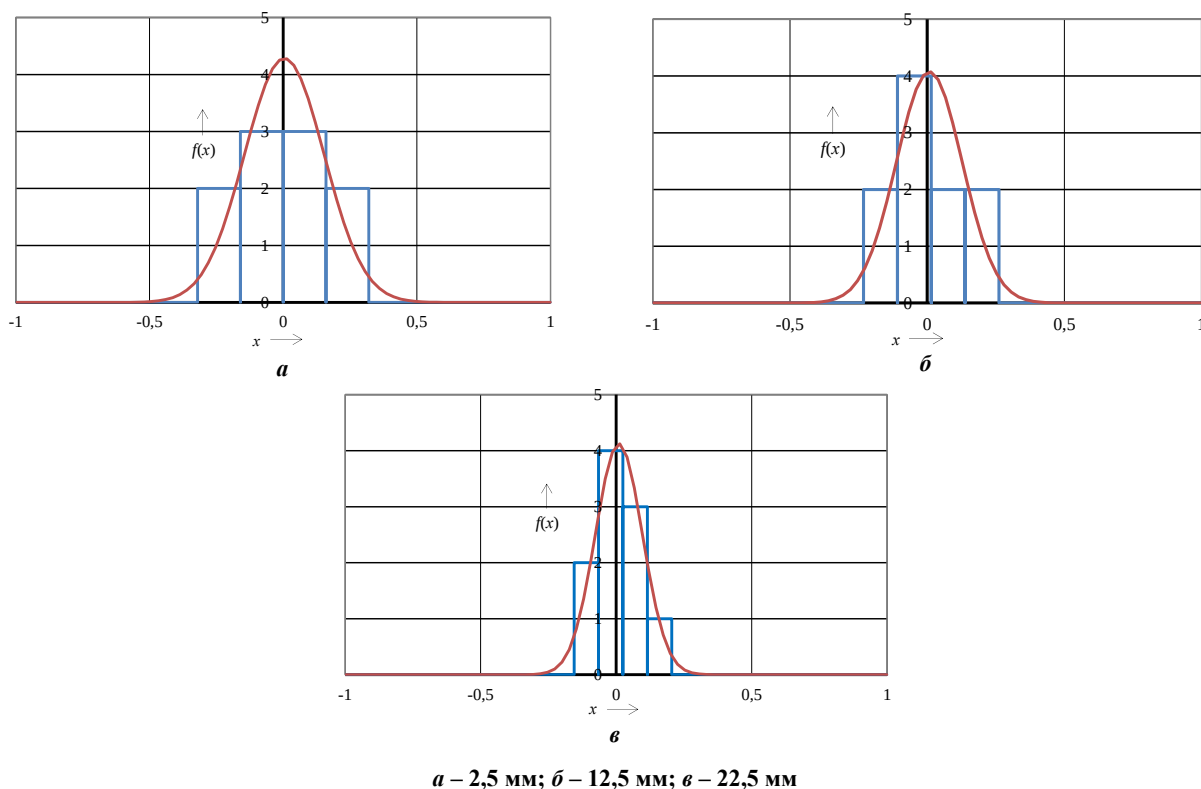


Рисунок 2. – Гистограмма остатков с нанесенной функцией плотности нормального распределения для сечений

Таблица 2. – Статистическая проверка остатков регрессионной модели

Параметр	«Нормальность» остатков		Отсутствие систематической ошибки	Попадание в 95%-й интервал, % значений КС ₀	Попадание в 50%-й интервал, % значений КС ₀
	Статистика Шапиро-Вилка, P-Value	Статистика Колмогорова-Смирнова, P-Value	t-статистика Стьюдента, P-Value		
Сечение 2,5 мм					
Остаток	0,906760	0,965678	0,934210	10	5
Сечение 12,5 мм					
	0,811967	0,959118	0,838677	10	4
Сечение 22,5 мм					
	0.892828	0.983681	0.724790	10	4

Проверка «нормальности» остатков осуществлялась критериями Шапиро-Вилка, Колмогорова-Смирнова, реализованными в пакете «Statgraphics». Отсутствие систематической ошибки определялось критерием Стьюдента. Значимость регрессионной модели оценивалась критерием Фишера.

Результаты статистической проверки остатков регрессионной модели для бетона класса по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ состава с ОК = 4 см приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Статистическая проверка остатков регрессионных моделей для бетона класса по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ состава с ОК = 4 см

Статистическая проверка		«Нормальность» остатков		Отсутствие систематической ошибки	Адекватность модели	
Параметр	Сечение, мм	Статистика Шапиро-Вилка, P-Value	Статистика Колмогорова-Смирнова, P-Value	t-статистика Стьюдента, P-Value	Статистика Фишера	
					F-ratio	P-Value
Остатки	2,5	0,906760	0,965678	0,934210	1038,47	<0,01000
	5,0	0,867493	0,857346	0,876819		
	7,5	0,882650	0,999813	0,950833		
	10,0	0,228906	0,578319	0,351257		
	12,5	0,811967	0,959118	0,838677		
	15,0	0,8766901	0,998773	0,381408		
	17,5	0,937936	0,994325	0,798246		
	20,0	0,923755	0,996482	0,436714		
	22,5	0,892828	0,983681	0,724790		
	25,0	0,793704	0,998996	0,417182		

По результатам проверки получено, что по всем сечениям значения показателя P-value (критерии Шапиро-Вилка, Колмогорова-Смирнова и Стьюдента) значительно больше 0,05, а для критерия Фишера значения показателя P-Value значительно меньше 0,05. Это свидетельствует о том, что гипотезы о нормальном распределении остатков и нулевом математическом ожидании остатков согласуются с фактическими данными, а также о том, что с вероятностью, превышающей 0,95 (принятой в инженерной практике для оценки уровня значимости), можно утверждать, что все полученные регрессионные модели адекватно описывают предложенные зависимости.

Полученные регрессионные зависимости для классов бетона по прочности на сжатие $C^{12}/_{15} \dots C^{50}/_{60}$ (смеси П1 ОК = 4 см) в графическом виде представлены на рисунке 3.

Для построения математической модели, адекватно отражающей процесс начальной карбонизации бетона по его сечению, на основе экспериментальных данных использовали методы регрессионного и корреляционного анализа. Подбор аппроксимирующей кривой подробно описан в [15].

Полученная регрессионная зависимость изменения показателя КС₀ (начальной карбонизации) по сечению для свежизготовленных бетонов (после ТВО) [7]:

$$КС_0(l/t=0) = \beta_0 + \beta_1 e^{\left(- \left(\frac{l - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} \right)}, \quad (1)$$

где $\beta_0 - \beta_4$ – коэффициенты, определяющие соответственно: β_0 – наименьшее значение КС(l) [обычно $\beta_0 = КС(l > 100 \text{ мм})$];

β_1 – разность минимального и максимального значений $KC(l)$;

β_2 – минимальное значение глубины l (обычно $\beta_2 = 0$);

β_3 – форму кривой и координаты точек перегиба, $\beta_3 > 0$;

β_4 – форму кривой и координаты точек перегиба, $\beta_4 > 0$.

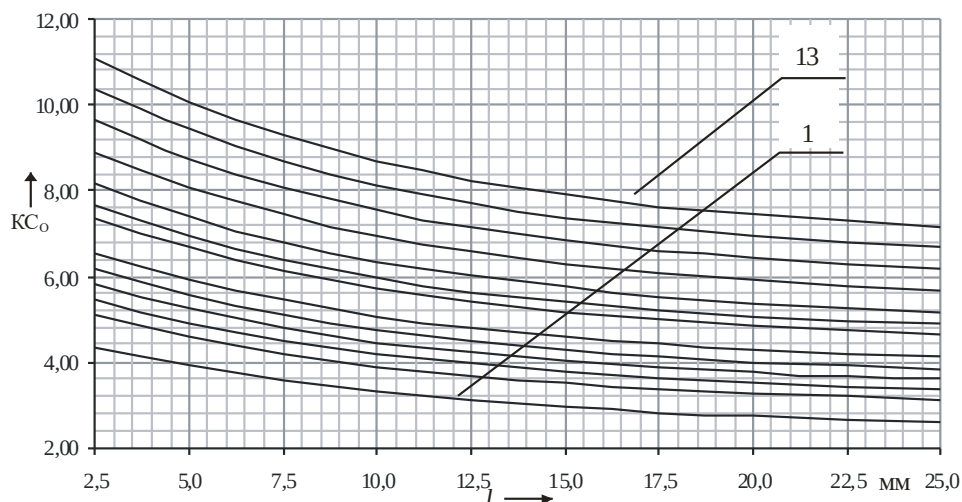


Рисунок 3. – Распределение карбонатной составляющей по сечению образцов бетона составов с ОК = 4 см сразу после ТВО для классов бетона по прочности на сжатие: 1 – $C^{12}/_{15}$; 2 – $C^{16}/_{20}$; 3 – $C^{18}/_{22,5}$; 4 – $C^{20}/_{25}$; 5 – $C^{22}/_{27,5}$; 6 – $C^{25}/_{30}$; 7 – $C^{28}/_{35}$; 8 – $C^{30}/_{37}$; 9 – $C^{32}/_{40}$; 10 – $C^{35}/_{45}$; 11 – $C^{40}/_{50}$; 12 – $C^{45}/_{55}$; 13 – $C^{50}/_{60}$

Параметры β_i ($i = 0 \dots 4$) нелинейной функции (1) определялись численно на ЭВМ методом наименьших квадратов.

При описании регрессионных уравнений были подобраны параметры β_i ($i = 0 \dots 4$), позволившие получить максимальные значения коэффициента детерминации (R^2) для каждого уравнения, однако параметры β_0 – β_4 для каждого класса бетона по прочности на сжатие близки, но отличаются, что не дает возможность их использовать при создании единой системы уравнений – модели, позволяющей прогнозировать изменение генерального элемента (показателя KC_0) для любого класса бетона по прочности на сжатие по значению показателя, в первую очередь определяющего карбонизацию бетона (количеству использованного цемента). Параметры β_2 – β_4 для каждого класса бетона по прочности на сжатие отличаются незначительно, поэтому в дальнейшем подбор параметров β_i осуществляли из условия равенства показателей β_2 , β_3 и β_4 для всех составов бетона. Это несколько снизило показатель R^2 для каждого регрессионного уравнения, но позволило создать систему взаимосвязанных уравнений с достаточной точностью.

Полученные параметры регрессионных уравнений для различных классов бетона по прочности на сжатие для составов с ОК = 4 см приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Значения параметров регрессионных уравнений l – KC_0 для бетонов различных классов по прочности на сжатие смесей П1 с ОК = 4 см

Класс бетона по прочности на сжатие	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	R^2
$C^{12}/_{15}$	2,43	785959	–100	5,05	0,85	0,978652
$C^{16}/_{20}$	2,91	895662				0,985486
$C^{18}/_{22,5}$	3,14	948744				0,986994
$C^{20}/_{25}$	3,37	1000057				0,987364
$C^{22}/_{27,5}$	3,60	1053139				0,989376
$C^{25}/_{30}$	3,85	1111529				0,988291
$C^{28}/_{35}$	4,37	1230079				0,988758
$C^{30}/_{37}$	4,57	1276083				0,990212
$C^{32}/_{40}$	4,87	1345090				0,993648
$C^{35}/_{45}$	5,35	1456562				0,994876
$C^{40}/_{50}$	5,83	1566265				0,986144
$C^{45}/_{55}$	6,29	1672429				0,973328
$C^{50}/_{60}$	6,75	1778593				0,998611

Регрессионные зависимости изменения показателя KC_0 по сечению для бетонов сразу после ТВО для составов с ОК = 4 см представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Регрессионные зависимости начальной карбонизации по сечению различных классов бетона по прочности на сжатие сразу после ТВО составов с ОК = 4 см

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость $KC_0 = f(\Pi_p)$	Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость $KC_0 = f(\Pi_p)$
$C^{12/15}$	$2,43 + 785959e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$C^{30/37}$	$4,57 + 1276083e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{16/20}$	$2,91 + 895662e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$C^{32/40}$	$4,87 + 1345090e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{18/22,5}$	$3,14 + 948744e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$C^{35/45}$	$5,35 + 1456562e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{20/25}$	$3,37 + 1000057e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$C^{40/50}$	$5,83 + 1566265e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{22/27,5}$	$3,60 + 1053139e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$C^{45/55}$	$6,29 + 1672429e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{25/30}$	$3,85 + 1111529e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$C^{50/60}$	$6,75 + 1778593e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{28/35}$	$4,37 + 1230079e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$		

Полученные зависимости (таблица 2) возможно использовать при проектировании ЖБЭ (ЖБК) при известных (заданных) классах бетона по прочности на сжатие.

Путем математической обработки коэффициентов β_0 и β_1 получены зависимости их значений от количества использованного цемента:

$$\beta_0 = 0,0077\Pi + 0,7932; (R^2 = 0,9969); \quad (2)$$

$$\beta_1 = 1769,4\Pi + 409077; (R^2 = 0,9959), \quad (3)$$

где Π – содержание цемента, кг/м³.

В общем виде зависимость начальной карбонизации бетона (для смесей П1) от количества использованного цемента

$$KC_0(l/t=0) = (0,0077\Pi + 0,7932) + (1769\Pi + 409077)e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}. \quad (4)$$

Таким образом, при проектировании состава бетона при известном (заданном) количестве цемента возможно использование зависимости (4).

Путем математической обработки коэффициентов β_0 и β_1 получены прогнозные регрессионные зависимости их изменения от гарантированной прочности бетона на сжатие для бетонных смесей различных марок по удобоукладываемости. Так, для смесей марки по удобоукладываемости П1

$$\beta_0 = 0,0970 f_{c,cube}^G + 0,9641; \quad (5)$$

$$\beta_1 = 22287 f_{c,cube}^G + 447979, \quad (6)$$

где $f_{c,cube}^G$ – гарантированная прочность бетона на сжатие, МПа.

Расчетно-экспериментальная зависимость начальной карбонизации $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ для бетонных смесей марки по удобоукладываемости П1

$$KC_0 = 0,0970 f_{c,cube}^G + 0,9641 + (22287 f_{c,cube}^G + 447979) e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}. \quad (7)$$

С учетом того, что количественное содержание цемента в первую очередь определяет абсолютные значения карбонатной составляющей сразу после изготовления бетона, путем математической обработки аналогично получены зависимости $KC_0 = f(\Pi)$ для смесей марок по удобоукладываемости Ж1 и Ж2. Расчетные содержания цемента (Π_p) приняты для смесей Ж1 для 7 с, смесей Ж2 – 15 с (таблица 6).

Таблица 6. – Регрессионные зависимости начальной карбонизации по сечению различных классов бетона по прочности на сжатие сразу после ТВО составов смесей Ж1 и Ж2

Класс бетона по прочности на сжатие	Регрессионная зависимость $KC_0 = f(\Pi_p)$ начальной карбонизации для смесей Ж1 (7 с)	Регрессионная зависимость $KC_0 = f(\Pi_p)$ начальной карбонизации для смесей Ж2 (15 с)
$C^{12/15}$	$2,30 + 754110e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$2,23 + 739955e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{16/20}$	$2,73 + 854966e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$2,65 + 835502e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{18/22,5}$	$2,94 + 902740e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$2,86 + 883276e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{20/25}$	$3,15 + 950513e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$3,05 + 9275116e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{22/27,5}$	$3,35 + 996518e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$3,24 + 971746e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{25/30}$	$3,54 + 1040753e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$3,42 + 1012442e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{28/35}$	$4,01 + 1148686e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$3,85 + 1111529e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{30/37}$	$4,18 + 1187613e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$4,02 + 1150456e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{32/40}$	$4,46 + 1251311e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$4,27 + 12088466e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{35/45}$	$4,90 + 1352167e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$4,70 + 1306163e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{40/50}$	$5,33 + 11451254e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$5,11 + 1399941e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{45/55}$	$5,74 + 1546801e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$5,50 + 1490180e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$
$C^{50/60}$	$6,16 + 1642349e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$	$5,90 + 1582189e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}$

Аналогично выведены зависимости $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ для прогнозирования начальной карбонизации для бетонных смесей марок по удобоукладываемости Ж1 и Ж2.

Расчетно-экспериментальная зависимость начальной карбонизации $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ для бетонных смесей:

– марки по удобоукладываемости Ж1

$$KC_0 = 0,0865 f_{c,cube}^G + 0,9866 + (19858 f_{c,cube}^G + 454249) e^{\left(-\left(\frac{f+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)};$$

– марки по удобоукладываемости Ж2

$$KC_0 = 0,0818 f_{c,cube}^G + 1,001 + (18776 f_{c,cube}^G + 457312) e^{\left(-\left(\frac{f+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}.$$

Заключение. Результаты исследований позволили получить системы расчетно-экспериментальных зависимостей начальной карбонизации от количества использованного цемента ($KC_0 = f(\Pi)$) бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/12} \dots C^{50/60}$ для бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2; расчетно-экспериментальные зависимости начальной карбонизации от гарантированной прочности бетона на сжатие ($KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$) для бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2.

Полученные зависимости ($KC_0 = f(\Pi)$) являются базовыми для создания системы расчетно-экспериментальных зависимостей карбонизации бетона (изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие в разных эксплуатационных средах).

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций: моногр. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 263 с.
2. Васильев А.А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона: моногр. – Гомель: БелГУТ, 2019. – 215 с.
3. Васильев А.А. К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2020. – № 1. – С. 77–80.
4. Papadakis V.G., Vayenas C.G., Fardis M.N. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation // ACI Materials Journal. – 1991. – Vol. 88, № 4. – P. 363–373.
5. Prediction model for carbonation of concrete structure considering heat and moisture transfer / Y. Kishimoto, Sh. Hokoi, K. Harada et al. // J. of Structural and Construction Engineering. – 2005. – № 70(595). – P. 17–23.
6. Czarnecki L., Woyciechowski P. Methods of concrete carbonation testing // Construction and Building Materials. – 2008. – № 426. – P. 5–7.
7. Czarnecki L., Woyciechowski P. Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space? // Bulletin of the Polish academy of sciences technical sciences. – 2015. – Vol. 63, № 1. – P. 43–54.
8. Ishida T., Maekawa K., Kishi T. Multi-scale Modeling of concrete performance // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2003. – Vol. 1, № 2. – P. 91–126.
9. Wang X. Lee H. A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash // Constr. and Build. Mater. – 2009. – Vol. 23, iss. 2. – P. 725–733. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.019.
10. Do Lago Helene P.R., Castro-Borges P. A novel method to predict concrete carbonation // Concreto y cemento. Investigación y Desarrollo. – 2009. – Vol. 1, № 1. – P. 25–35.
11. Galan I., Andrade C. Comparison of Carbonation Models // 3rd International RILEM PhD Student Workshop on modeling the Durability of Reinforced Concrete, Guimarães, Portugal, University of Minho, 22–24 October 2009 / ed.: R.M. Ferreira, J. Gulikers, C. Andrade. – Guimarães, 2009. – P. 41–49.
12. Васильев А.А. К вопросу необходимости учета карбонизации бетона в нормативных документах Республики Беларусь по оценке технического состояния железобетонных элементов и конструкций // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. – 2017. – № 1(34). – С. 87–88.
13. Васильев А.А. Экспресс-метод определения карбонатной составляющей (показателя КС) цементно-песчаной фракции бетона // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. – 2021. – № 1(42). – С. 94–97.
14. Определение начальной максимальной величины карбонизации бетона / А.А. Васильев, Ю.К. Кабышева, Н.А. Леонов и др. // Лучшая научная работа 2022: сб. ст. VII междунар. науч.-исслед. конкурса; под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2022. – С. 23–30.
15. Васильев А.А. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона: моногр. – Гомель: БелГУТ, 2016. – 263 с.

REFERENCES

1. Vasil'ev, A.A. (2012). *Karbonizatsiya i otsenka povrezhdennosti zhelezobetonnykh konstruksii: monogr.* Gomel': BelGUT. (In Russ.).
2. Vasil'ev, A.A. (2019). *Otsenka i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh konstruksii s uchedom karbonizatsii betona: monogr.* Gomel': BelGUT. (In Russ.).

3. Vasil'ev, A.A. (2020). K voprosu ob'ektivnosti sovremennoi otsenki i prognozirovaniya karbonizatsii betona na osnove indikatornogo metoda [On the issue of objectivity of modern assessment and prediction of concrete carbonization based on the indicator method]. *Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Ser. Str-vo i arkhitektura*, (1), 77–80. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Papadakis, V.G., Vayenas, C.G. & Fardis, M.N. (1991). Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. *ACI Materials Journal*, 88(4), 363–373.
5. Kishimoto, Y., Hokoi, Sh., Harada, K. & Takada, S. (2005). Prediction model for carbonation of concrete structure considering heat and moisture transfer. *J. of Structural and Construction Engineering*, 70(595), 17–23.
6. Czarniecki, L. & Woyciechowski, P. (2008). Methods of concrete carbonation testing. *Construction and Building Materials*, (426), 5–7.
7. Czarniecki, L. & Woyciechowski P. (2015). Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space? // *Bulletin of the Polish academy of sciences technical sciences*, 63(1), 43–54.
8. Ishida, T., Maekawa, K. & Kishi, T. (2003). Multi-scale Modeling of concrete performance. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(2), 91–126.
9. Wang, X. & Lee, H. (2009). A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash. *Constr. and Build. Mater.*, 23(2), 725–733. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.019.
10. Do Lago Helene, P.R. & Castro-Borges, P. (2009). A novel method to predict concrete carbonation. *Concreto y cemento. Investigación y Desarrollo*, 1(1), 25–35.
11. Galan, I. & Andrade C. (2009). Comparison of Carbonation Models. In R.M. Ferreira (Eds.), J. Gulikers (Eds.) & C. Andrade (Eds.) *3rd International RILEM PhD Student Workshop on modeling the Durability of Reinforced Concrete* (41–49). Guimarães: University of Minho.
12. Vasil'ev, A.A. (2017). K voprosu neobkhodimosti ucheta karbonizatsii betona v normativnykh dokumentakh Respubliki Belarus' po otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov i konstruksii [On the issue of the need to take into account the carbonation of concrete in the regulatory documents of the Republic of Belarus on the assessment of the technical condition of reinforced concrete elements and structures]. *Vestn. BelGUTa: nauka i transport [Bulletin of BSUT: science and transport]*, 1(34), 87–88. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Vasil'ev, A.A. (2021). Ekspres-metod opredeleniya karbonatnoi sostavlyayushchei (pokazatelya KS) tsementno-peschanoi fraktsii betona [Express method of determination of carbonate component (CC index) of cement-sand fraction of concrete]. *Vestn. BelGUTa: nauka i transport [Bulletin of BSUT: science and transport]*, 1(42), 94–97. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Vasil'ev, A.A., Kabysheva, Yu.K., Leonov, N.A. & Dolya, V.A. (2022). Opredelenie nachal'noi maksimal'noi velichiny karbonizatsii betona [Definition of initial maximum concrete carbonization]. In G.Yu. Gulyaev (Eds.) *Luchshaya nauchnaya rabota 2022: sb. st. VII mezhdunar. nauch.-issled. konkursa* (23–30). Penza: MTsNS «Nauka i prosveshchenie». (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Vasil'ev, A.A. (2016). *Raschetno-eksperimental'naya model' karbonizatsii betona: monogr.* Gomel': BelGUT. (In Russ.).

Поступила 01.07.2024

CALCULATION AND EXPERIMENTAL DEPENDENCIES OF INITIAL CARBONATION OF CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH CLASSES $C^{12/15} \dots C^{50/60}$

A. VASILIEV, U. KABYSHEVA, M. TKACHEVA
(Belarusian State University of Transport, Gomel)

The article substantiates the need to study the preliminary carbonization of concrete. Based on laboratory studies of concrete samples of compressive strength classes $C^{12/15} \dots C^{50/60}$, mixture compositions of workability grades P1 ($OK = 4$ cm), a system of calculated and experimental dependencies of initial carbonization $KC_0 = f(l)$ was obtained. The dependencies were checked using mathematical statistics methods, which showed the adequacy of the obtained dependencies.

Obtained depending on the preliminary carbonization $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ on the guaranteed compressive strength of concrete for mixtures of workability grade P1.

By mathematical processing of the dependence coefficients derived from the dependence of the initial carbonization $KC_0 = f(l_p)$ and $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ for classes of concrete in terms of compressive strength $C^{12/15} \dots C^{50/60}$, mixture compositions of workability grades G1 (8 s) and G2 (15 s).

Keywords: concrete, carbonation, carbonate component, initial carbonation of concrete.

УДК 624.19:69.058.4

DOI 10.52928/2070-1683-2024-38-3-28-37

ИМПЛЕМЕНТАЦИЯ ПРОЦЕССА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И СИСТЕМЫ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СООРУЖЕНИЙ

канд. техн. наук, доц. В.Н. КРАВЦОВ^{1), 2)}, канд. техн. наук С.М. ЭГБАЛНИК²⁾

⁽¹⁾ РУП «Институт БелНИИС», Минск, ⁽²⁾ Белорусский национальный технический университет, Минск),
^{1), 2)} f3@belniis.by

Рассмотрен широкий круг вопросов организации и обеспечения научно-технического сопровождения строительства (НТСС) и его основной составляющей части – геотехнического мониторинга (ГМ), осуществляющего, в частности, контроль качества ограждающих стен котлованов, оснований, фундаментов, конструкций подземных и надземных возводимых и эксплуатируемых зданий, сооружений, примыкающих к ним территорий и окружающей существующей застройки. Изложены основы современных методов наблюдений (измерений), применяемые для этого технические средства (датчики, приборы и др.), рассмотрены принципы комплексного, в т.ч. автоматизированного, мониторинга на основе численной модели объекта, обеспечивающие безопасность строительства по результатам измерений контролируемых параметров в объеме, требуемом для разработки главы проекта по ГМ. Приведены данные о целях, составе, техническом оснащении, системной (общей) и рабочих программах геотехнического мониторинга на основе исследований и накопленного опыта его проведения за состоянием высотных и уникальных объектов.

Ключевые слова: безопасность, регламент и средства наблюдений за состоянием контролируемого объекта (НТСС, ГМ), система простого и комплексного автоматизированного мониторинга, программы ГМ, законодательная метрология.

Введение. Современное строительство в черте крупных городов часто связано с возведением объектов повышенного риска опасности для окружающей среды (высотных, уникальных, гражданских и промышленных сооружений с большой массой и нагрузками на основание, в т.ч. ветровыми, сейсмическими и др.), часто возводимых, в связи с законодательными ограничениями на использование пахотных земель для строительства, на территориях со сложными грунтовыми условиями (неудоби, поймы, свалки, как правило с наличием в составе их оснований биогенных, «слабых», обводненных грунтов и др.), ранее не используемых для этих целей. Каждое такое сооружение по техническим и инженерно-геологическим условиям индивидуально и представляет собой единый геолого-технический объект в виде сложной геотехногенной системы [1] в условиях риска негативных последствий, требующей индивидуального подхода к контролю ее безопасности, стабильности (конструкций, оснований) посредством изучения динамики протекающих в ней процессов изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) объекта как в период его строительства, так и эксплуатации (далее объекты повышенного строительного и эксплуатационного риска).

Исходя из этого, в современной зарубежной и отечественной практике научно-техническое сопровождение строительства (далее НТСС) и его основная составная часть – геотехнический мониторинг (далее ГМ) – стали обязательной процедурой строительства, которая регламентируется национальными нормами (ТНПА)^{1,2,3}, ISO и Еврокодами^{4,5}, предусматривающими (устанавливающими) исследования и испытания оснований и конструкций возводимых сооружений с использованием соответствующего набора приборов, оборудования и средств измерений, которые предназначены для постоянного наблюдения за контролируемым объектом в целом и за отдельными его конструкциями и основанием в частности, а также за находящимися в зоне его влияния территорией и существующей застройкой, с целью своевременного выявления, предотвращения различных опасных ситуаций, рисков и корректировки (при необходимости) проектных и технологических решений.

Согласно требованиям действующих отечественных норм (ТНПА), обеспечение безопасности сооружений классов сложности (К1-К3) осуществляется специализированными организациями в рамках НТСС, одной из определяющих составных частей которого является ГМ, включающий периодический «простой» инструментальный контроль за качеством конструкций и процессом производства работ для зданий классов сложности (К3-К5)

¹ СН 3.02.08-2020. Высотные здания. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 69 с. – прил. Г, В.

² СП 5.01.01-2023. Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2023. – 143 с. – разд. 12.

³ СН 2.01.01-2022. Основы проектирования строительных конструкций. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 65 с.

⁴ ТКП EN 1997-1-2009. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Часть 1. Общие правила. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 129 с.

⁵ ISO 18674-1:2015. Geotechnical investigation and testing – Geotechnical monitoring by field instrumentation. Part 1: General rules.

на однородных основаниях категории I, выполняемый методами, описанными в [2–6], и непрерывный, в т.ч. автоматизированный ГМ, описанный в [6–13] на всех этапах строительства и эксплуатации наблюдаемого объекта, входящие, в соответствии с требованиями норм, в проект в виде одного из его разделов.

В то же время, как в национальных, так и в зарубежных нормах отсутствуют сведения о порядке разработки разделов, программ по НТСС, ГМ с конкретными рекомендациями по методам, средствам, оборудованию (приборы, инструменты, датчики и др.), автоматизированным системам мониторинга, метрологическому обеспечению и развертыванию ГМ на наблюдаемом объекте, с учетом геотехнических условий строительства. В них приводятся концептуальные (не конкретные) рекомендации общего технического характера без привязки инструментов мониторинга к архитектурно-конструктивно-геотехногенной ситуации, в которой находится объект, и к НДС его конструкций и основания.

Исходя из этого, цель работы – по результатам исследования и обобщения накопленного опыта проведения НТСС, ГМ сформулировать для исполнителей работ алгоритм и методологию их организации и проведения, в объеме раздела проекта по ГМ.

Основная часть.

1. Обеспечение НТСС. Объекты повышенного уровня опасности с экономическими, социальными и летальными классами последствий (СС2, СС3) оказывают значительные воздействия на основание и существующую окружающую (экологическую) среду. Поэтому их возведение требует комплексной экспертизы застраиваемой территории, подземного пространства; анализа инженерно-геологических и техногенных условий строительства [1], в частности, принятых проектных решений ограждений котлованов, гидроизоляции, конструкций подземной и надземной частей, расчетных ситуаций, моделей и технологической последовательности строительства; выполнения геотехнических работ и др.⁶ [1; 6].

Они являются уникальными и возводятся по индивидуальным проектам в соответствии со специальными техническими условиями (СТУ)⁷, т.к. не имеют аналогов и достаточного нормативного обеспечения [7; 8]. Учитывая это на всех стадиях: инвестиций, изысканий, проектирования, возведения и эксплуатации, согласно данным⁸, следует вести НТСС, которое выполняется специализированной организацией, согласованной Минстройархитектуры Республики Беларусь по предложению заказчика (генпроектировщика).

В соответствии с СТУ, НТСС должно обеспечить безопасность, эффективность работ и надежность конструкций надземной и подземной частей наблюдаемых объектов, снизить их влияние на прилегающие к ним территории, окружающую застройку и оперативно исключить возможные отклонения от данных, заложенных в проект.

Исходя из этого, в рамках НТСС необходимо проводить комплексную оценку проектных решений, в т.ч. ограждений котлованов, конструкций подземной и надземной частей, результатов инженерных изысканий (ИИ), гидрогеологического прогноза; оценку взаимного влияния друг на друга возводимых и существующих сооружений, технологических регламентов на отдельные виды работ, скорости и последовательности этапов строительства, а также программ ГМ на проведение и развертывание мониторинга, которое в частности включает^{9,10,11} [2; 6; 10–13]:

- экспертизу инженерно-геологических изысканий на предмет их достаточности для проверки предельных состояний, в т.ч. с использованием метода конечных элементов (МКЭ), и соответствия требованиям норм;
- комплексную экспертизу рабочих программ по видам геотехнического мониторинга, составленных на основе общей программы мониторинга организации НТСС и ТЗ заказчика (генпроектировщика);
- локальные экспертизы проектных решений, расчетов и результатов математического моделирования, включая гидрогеологический прогноз;
- экспертизу технологий (ПОС, ППР) на выполнение геотехнических работ с выборочным контролем соблюдения качества геотехнических работ по результатам их испытаний;
- научно-техническую помощь при выборе и применении новых материалов и технологий;
- разработку системной общей программы геотехнического мониторинга (СПГМ) и др.

Экспертиза по вышеуказанным перечислениям осуществляется на основе архивных материалов, данных инженерных изысканий, условий строительства и конструктивных решений, прогноза изменения состояния и свойств грунтов оснований, конструкций во времени. В связи с этим следует тщательно оценивать примененные методы испытаний, наблюдений и точность определения их характеристик, а также технологии производства геотехнических работ, качество которых напрямую зависит от квалификации персонала, выполняющего указанные работы, а также проводить выборочный контроль качества выполнения работ на всех этапах строительства.

Организация, осуществляющая НТСС, должна решать все текущие технические вопросы и на основе имеющихся материалов (проектов, ТНПА, отчетов по изысканиям, экспертных заключений, рекомендаций, данных по видам выполненных рабочих мониторингов и др.) оказывать научно-техническую помощь, а в случае необходимости вносить предложения по корректировке проектных решений, технологии работ и разработанной

⁶ См. сноски 1 и 2.

⁷ См. сноску 1.

⁸ См. сноски 1 и 2.

⁹ См. сноски 1 и 2.

¹⁰ См. сноски 3, 4, 5.

¹¹ СН 1.02.01-2019. Инженерные изыскания для строительства. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 108 с.

ей СПГМ, утверждаемой заказчиком (инвестором) и включенной в проект в качестве одного из его разделов. СПГМ является основой для составления локальных рабочих программ мониторинга (РПГМ) и его проведения по следующим обязательным отдельным видам контролируемых на объекте процессов:

- состояние прилегающих к объекту (особенно при экскавации котлована) территорий окружающей застройки (зданий и сооружений), в т.ч. различных сетей и подземных коммуникаций;
- смещение по вертикали (подъем, осадка) и горизонтали оснований, фундаментов контролируемых зданий, в т.ч. сооружений окружающей застройки, попадающих в зону их влияния в процессе строительства и эксплуатации объектов;
- уровень подземных вод (ПВ) и их характеристики;
- смещение по вертикали и горизонтали ограждающих конструкций котлована (СКГ), начиная с возведения ограждения (стены), экскавации грунта и до окончания возведения объекта;
- давление на грунт под подошвой плитного фундамента или низа ростверка свайного фундамента;
- смещение слоев грунта под подошвой плитных (условной подошвой свайного) фундаментов по глубине сжимаемой зоны и в межсвайном пространстве, а также на прилегающей территории в зоне влияния контролируемого объекта;
- напряжение и деформации в подземных и надземных конструкциях (в т.ч. в фундаментах, сваях).

При этом до начала наблюдения за объектом повышенного риска опасности (до начала строительства) необходимо выполнить следующее:

- за пределами зоны влияния наблюдаемых объектов создать геодезическую реперную систему и установить в уровне верха фундаментов (цоколе) существующих сооружений геодезические марки для измерения вертикальных и горизонтальных смещений согласно указаниям локальных рабочих программ на данный вид измерений;
- разработать СПГМ и на ее основе локальные рабочие программы РПГМ на каждый отдельный вид наблюдений по вышеуказанным перечислениям, согласованным организацией, осуществляющей НТСС; заказать необходимое сертифицированное измерительное оборудование, имеющееся в метрологическом реестре Республики Беларусь, и выполнить работы по его калибровке и юстировке;
- в обязательном порядке провести визуальное обследование окружающей застройки (ОЗ) и заактивировать двусторонними актами установленные дефекты и отказы (в процессе строительства визуальные наблюдения проводятся с периодичностью, регламентируемой СПГМ и РПГМ, но не реже 1 раза в квартал).

2. Имплементация и обеспечение ГМ. Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что ГМ является трудоемким и затратным процессом, доля которого, от общей стоимости объекта, достигает 10%. Поэтому проектирование, инструментальное обеспечение и развертывание ГМ на контролируемых объектах должны проводиться исходя из геотехногенных условий (инженерно-геологических, конструктивных и др.), целей (см. введение), вытекающих из них задач мониторинга (цена-качество-безопасность) и, основываясь на этом, базироваться на следующих двух подходах (способах) его осуществления.

Подход 1 – традиционный периодический (непостоянный) ГМ в виде обычных недорогих геодезических наблюдений (измерений) и контроля качества материала конструкций с использованием как традиционных нивелиров, теодолитов¹² и неразрушающих (физических) методов испытания материалов [2; 6], так и цифровых, в т.ч. спутниковых GPS-технологий для зданий и сооружений со средним и низким социально-экономическим ущербом и отсутствием летального риска (сложности К3, К4), расположенных на однородных устойчивых (простых) основаниях по СП 5.01.01-2023¹³.

Подход 2 – постоянный, как правило, автоматический ГМ, осуществляемый комплексно с использованием датчиков измерений с регистрацией данных, как в непрерывном режиме, так и сеансами с частотой, установленной РПГМ [6–13], для сооружений и зданий классов сложности (К1 и К2) на основаниях категории сложности (II и III) по СН 1.02.01-2019¹⁴.

2.1. Основные принципы разработки и развертывания ГМ. Мониторинг объекта осуществляется в соответствии с его общей СПГМ, направленной на проведение комплекса наблюдений, в том числе инструментальных (регламента), за контролируемым объектом, включая подготовительный период (инженерные изыскания, подготовительные работы по разработке котлована, ограждающей стены (рисунок 1) и др.), и устанавливает требования к:

- составу, средствам, порядку и контролируемым характеристикам (показателям качества мониторинга);
- схемам расположения (рисунки 1–3) контролируемых точек и геодезической основы, приборам, оборудованию (в т.ч. необходимости автоматизированных станций и коммутационных линий);
- периодичности наблюдений;
- методикам и производству измерений;
- методам оценки качества выполненных измерений и контролю стабильности реперов геодезической основы, приборам и коммутационным линиям;
- объему и срокам отчетности по выполненным работам.

¹² См. сноску 11.

¹³ См. сноску 2.

¹⁴ См. сноску 2.

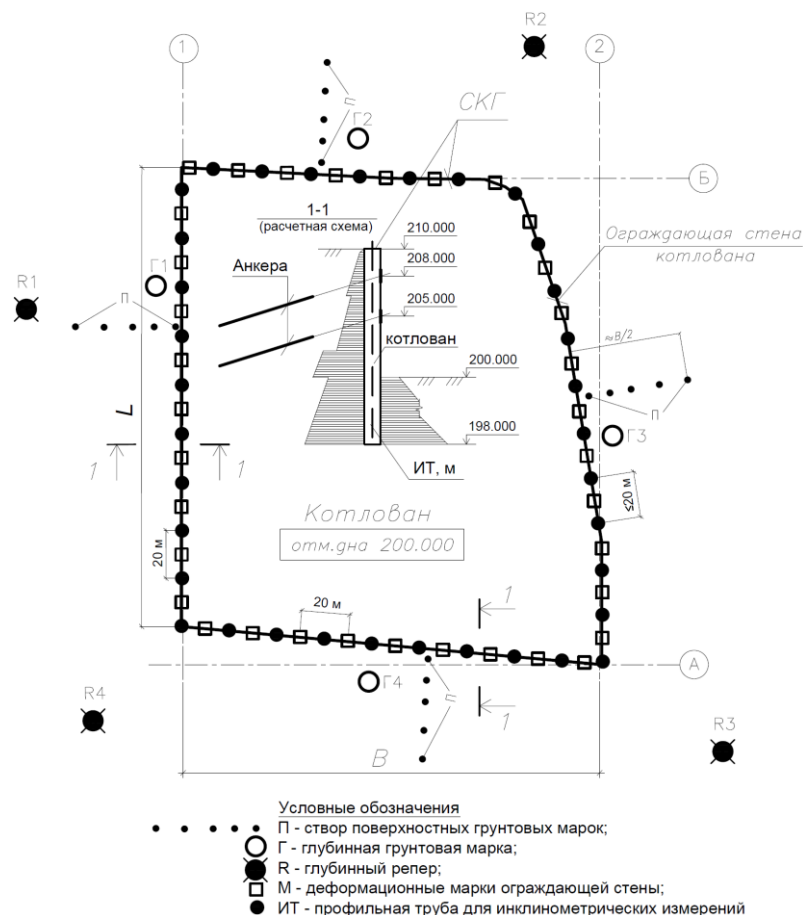


Рисунок 1. – Пример схемы расстановки инструментально-измерительного оборудования при мониторинге монолитной ограждающей стены (СКГ) котлована объекта сложности (K1, K2)

ГМ объекта, в зависимости от подходов (1 или 2), включает в себя разный набор схем по трудоемкости, стоимости из следующих видов мониторингов (ГМ) и контролируемых процессов:

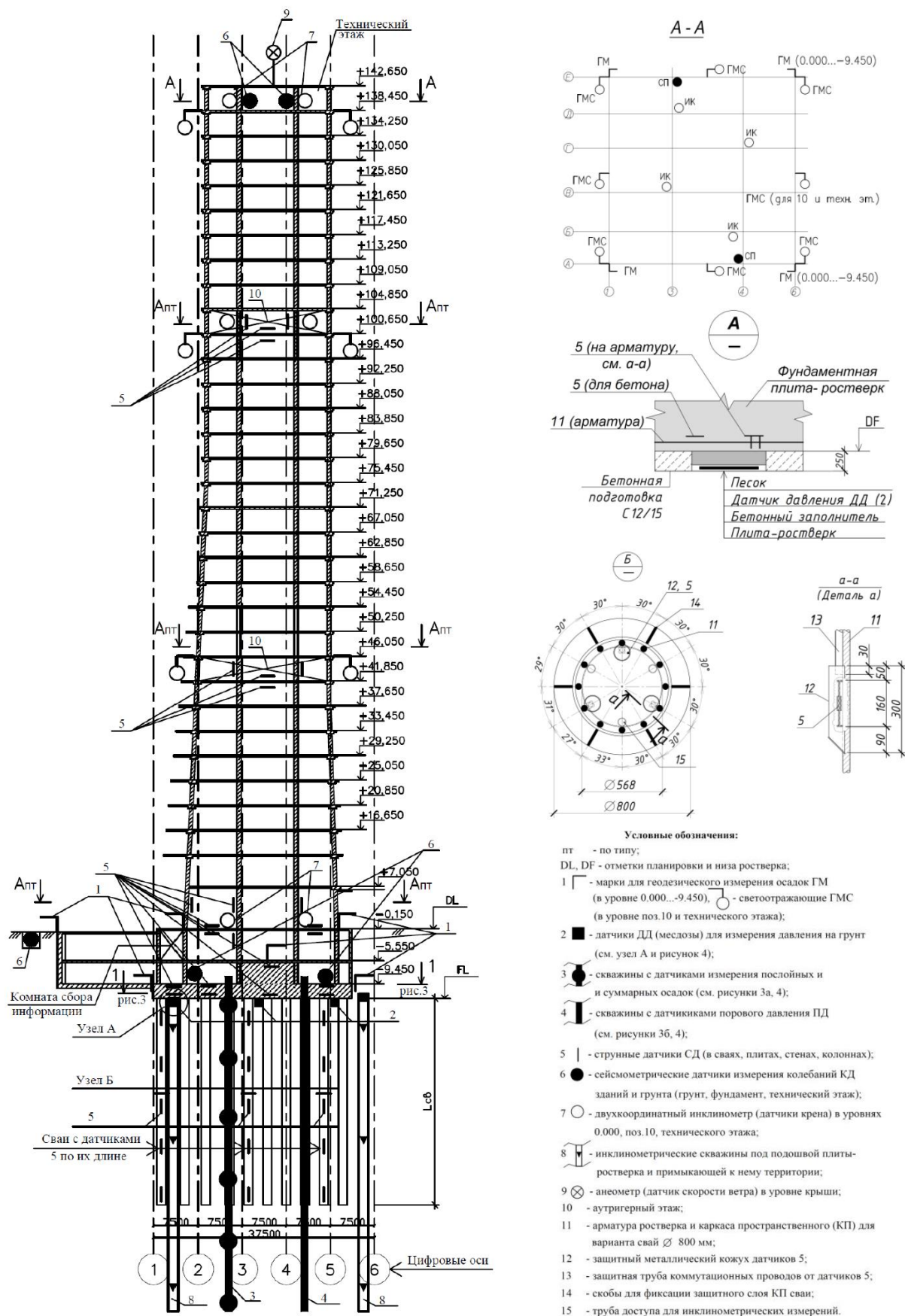
1) геодезический, как традиционный с помощью нивелиров, теодолитов и др., так и с использованием современных спутниковых GPS-технологий или цифровых датчиков (далее – МГЗ) для наблюдения за состоянием (осадка, подъем, крен, перемещения) существующих зданий (в т.ч. конструкций), сооружений, сетей, коммуникаций, ограждения стены котлована (СКГ), фундаментов, конструкций подземной и надземной частей объекта с фиксацией трещин и наблюдением за их развитием во времени, за смещением грунта в основаниях фундаментов и на прилегающих к ним территориях;

2) гидрогеологический (далее – МГГ) для оценки уровня подземных вод (ПВ), в т.ч. во времени и их характеристик, который должен обеспечить контроль текущего состояния ПВ и прогноз их изменения на период строительства и эксплуатации сооружения и разработкой геофильтрационной и геомиграционной моделей и параметров геологической среды до 25 лет, а также мероприятий (при необходимости) по исключению развития негативных последствий от влияния на объект гидрогеологических условий;

3) технический (далее – МТ), состоящий: а) из инженерно-геологических наблюдений за грунтовым массивом основания фундаментов и прилегающих территорий с измерением послойных и общих осадок грунта, уровня воды и порового давления и напряжений в грунте под подошвой фундаментов и по длине свай; б) наблюдений за конструкциями фундаментов, подземной (ПЧ) и надземной (НЧ) частей сооружения, в частности с оценкой (определением) усилий в анкерах, напряжений и деформаций в изгибаемых железобетонных и распорных конструкциях, их горизонтальных смещений и кренов и др. (см. рисунки 1–3);

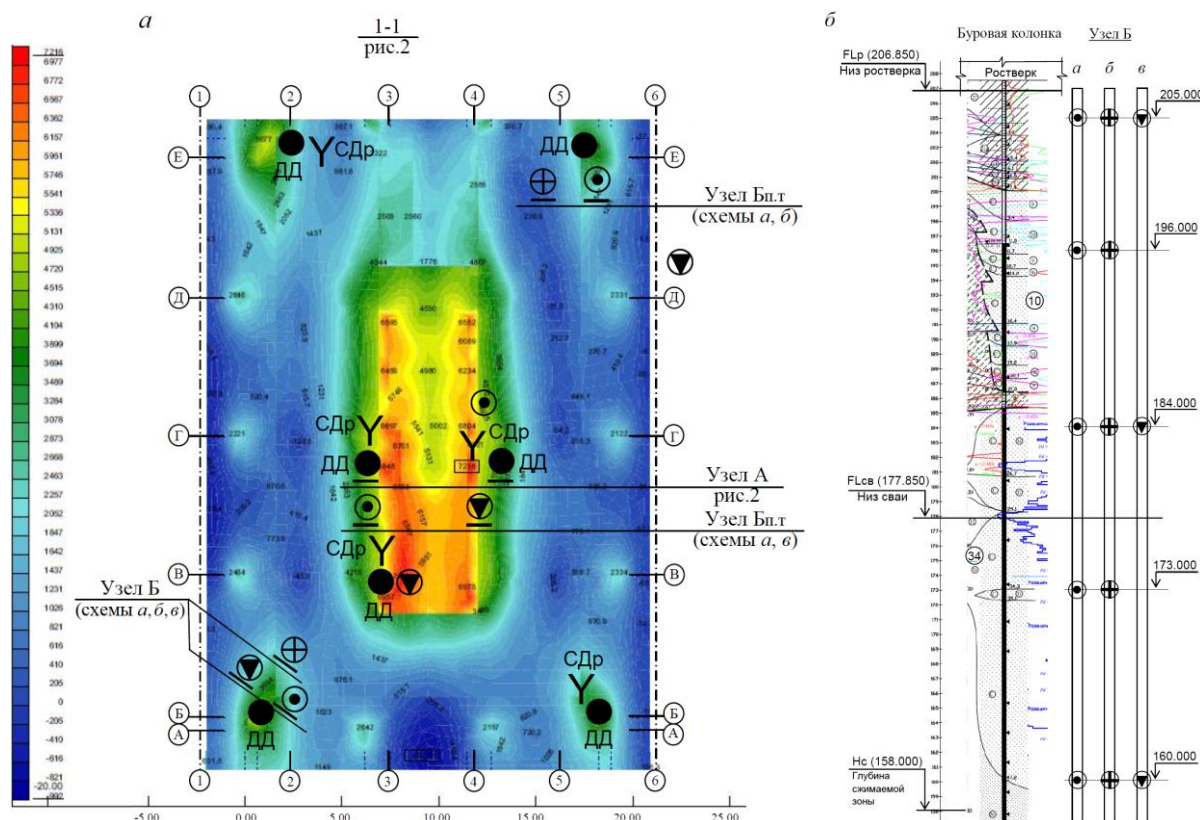
4) сейсмодинамический (далее – МСД) для оценки вибродинамических колебаний здания, конструкций и грунта, осуществляемый с целью определения внешних динамических и собственных колебаний сооружений в процессе строительства и эксплуатации; включает комплекс динамических наблюдений (ветровых, сейсмических) для оценки внешних воздействий и реакций зданий на основе стационарных пунктов мониторинга в грунте рядом с объектом на нижнем и верхнем этажах;

5) экологический (далее – МЭ) для оценки уровня загрязнения окружающей среды (воздуха, грунтов, подземных вод), наличия опасных электрофизических полей, газовыделения, радиационного излучения, перечень которых определяется в РПГМ в соответствии с СТБ 17.08.02-01, а уровень загрязнения – в ГОСТ 17.2.3.01, ГОСТ 17.2.4.02, отклонения от которого в 1,5 раза является геотехнической аномалией.



DL, FL – соответственно отметки планировки и подошвы плиты-ростверка (низа свай)

Рисунок 2. – Пример схемы расстановки инструментального оборудования для комбинированного (простого / автоматизированного) мониторинга здания класса сложности (К1, К2) на основаниях категории сложности (II и III)



Условные обозначения: Υ – струнные экстензометры (струнные СДр – в плите-ростверке); $\bullet$ – датчики давления (ДД) в подошве плиты-ростверка и их номера (см. узел А на рисунке 2); скважина: $\odot$ – для определения послойных и суммарных осадок; ∇ – для инклинометрических измерений горизонтальных смещений грунта; $\oplus$ – для определения уровня подземных вод (ПВ) и порового давления; $\textcircled{10}$ – инженерно-геологический элемент (ИГЭ); п.т. – по типу

Рисунок 3. – Пример схем расположения инструментального оборудования по разрезу 1-1 на рисунке 2 в плите-ростверке (а) для измерения НДС и в скважинах для измерений (а, б, в) под его подошвой (б), совмещенных с результатами численных расчетов

Геотехнический мониторинг производится по РПГМ на каждый его вид по перечислениям (1–5), разрабатываемым специализированными организациями, его осуществляющими, на основе требований СПГМ, которая является обязательной для всех организаций, выполняющих геотехнический мониторинг и экспертную оценку их результатов. Ее требования являются минимальными для проведения всех видов мониторинга и при составлении конкретных рабочих программ могут быть ужесточены (расширены) или снижены после согласования с заказчиком и организацией НТСС.

Общая система мониторинга должна интегрировать (объединять) отдельные РПГМ и фиксировать следующие показатели (см. рисунки 1, 2):

- нагрузки (воздействия, в т.ч. ветровые, сейсмические, техногенные);
- неравномерные и абсолютные (послойные и суммарные) осадки оснований зданий и сооружений;
- колебания строительных конструкций;
- наклоны, прогибы и крены строительных конструкций и здания в целом;
- геометрические параметры здания с использованием автоматизированной высокоточной геодезической аппаратуры;
- деформации строительных конструкций (фундаментная плита, колонны, перекрытия, диафрагмы, несущие стены);
- температурно-влажностный режим.

2.2. Инструментально-техническое оснащение и средства обеспечения ГМ в системе АСГМ. Система ГМ проектируется из инструментально-приборной части и программного обеспечения, собирающего и обрабатывающего данные о состоянии объекта, и должна обеспечивать единство концепции, методов и средств его инструментального осуществления.

Система сбора, управления и первичной обработки результатов ГМ направлена на централизованное управление, получение и обработку данных измерений по п.2.1, полученных с использованием каналов проводной или беспроводной связи, хранение результатов измерений, проверку работоспособности, юстировку и калибровку первичных датчиков и оборудования.

Для объективного анализа результатов мониторинга напряженно-деформационного состояния (НДС) грунтов оснований и несущих конструкций, проведения инженерных расчетов по оценке возникновения и развития дефектов в них, в том числе в различных кризисных ситуациях, на предварительной стадии ГМ должна быть разработана математическая компьютерная модель объекта (МКМ), которая в ходе проведения ГМ уточняется при получении текущих показаний датчиков системы мониторинга. После всех уточнений МКМ должна максимально соответствовать фактическому состоянию объекта ГМ и использоваться на стадиях его строительства и эксплуатации для анализа результатов мониторинга; оценки и прогноза развития выявленных дефектов во времени.

Все РПГМ (см. п.2.1) и их компьютерные версии должны интегрироваться в общую автоматизированную систему сбора данных (АСГМ), оснащенную комплексом специального программного обеспечения для обработки данных со всех подсистем наблюдений и отображения полученных от них результатов, оценки технического состояния (устойчивости, сейсмостойкости, остаточного ресурса долговечности) и определения мер, обеспечивающих эффективную эксплуатацию объекта ГМ.

АСГМ должна содержать программный модуль (спецпроцессор) и критерии для определения технического состояния несущих конструкций, а также обеспечивать:

- интегрированную обработку различных наблюдений, поступающих от комплексов локальных измерений технического состояния разнородных подсистем объекта ГМ по п.2.1, и алгоритм оценки их результатов по критериям сравнения, установленных ТНПА, проектом и специалистами применительно к наблюдаемым зданиям на начальной стадии эксплуатации системы мониторинга, в процессе строительства и после ввода его в эксплуатацию;

- возможность отображения на трехмерной модели объекта мест и динамики развития дефектов (в том числе скрытых) и внешних факторов (например, зон образования критических деформаций и напряжений в основании фундаментов, конструкциях зданий в объеме ГМ) и быть открытой для интеграции с системами диспетчеризации и управления инженерным оборудованием для передачи в ее систему информации об ухудшении технического состояния наблюдаемых конструкций и оснований.

В АСГМ должны применяться апробированные и сертифицированные в установленном порядке способы, технические и программные средства для определения технического состояния основания и несущих конструкций объекта ГМ.

2.2.1. Требования к инструментам и методам мониторинга напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов и грунтов в системе АСГМ. В системе АСГМ для контроля динамики развития напряжений в грунтах основания и конструктивных элементах сооружения используются датчики и оборудование различных типов (в зависимости от этапов, целей, задач, мест и схем установки). Их следует подразделять на минимально обязательные, обеспечивающие эксплуатационную безопасность сооружения и рекомендуемые для общей полной оценки его состояния, правильности принятых расчетных схем (моделей) и проектных решений, соответствия фактическому поведению грунтов и конструкций реальным условиям строительства с оптимизацией и прогнозированием их состояния во времени. Информация от датчиков, как правило, при помощи сигнальных кабелей сводится в специально оборудованную комнату мониторинга в уровне 1-го этажа объекта, откуда производится опрос, контроль и хранение их показаний. Пример рекомендуемого оснащения одного из объектов класса сложности (K1, K2) для стадий строительства и эксплуатации дан на рисунках 1–3 и в таблице 1.

Таблица 1. – Пример минимально-обязательного состава и объема (количества) первичных приборов, оборудования (датчиков), согласно программам геотехнического мониторинга (ГМ), объекта класса сложности K1 с учетом требований норм, необходимых для обеспечения его безопасности в неблагоприятных условиях строительства

Модель датчика, оборудования	Измеряемый параметр	Предел, точность измерения	Длина кабеля, м	Места установки и количество
1	2	3	4	5
На ВЗ № (5.2, 5.3, 5.4)				
1. Экстензометры для конструкций	Измерение деформации: – в арматуре: надземных конструкций – в бетоне: надземных конструкций	Резистивные 1500 мк, струнные 3000 мк, разрешение 1 мк, температура (-20...+70) °С	По проекту РПГМ исполнителя	По результатам численных расчетных полей нагрузок, НДС оснований и конструкций в зонах предельной их нагруженности по основным осям плана
2. Скважинные экстензометры	Автоматизированное послойное измерение осадок	0-150 мм	То же	То же
3. Скважинные инклинометрические зонды в инклинометрической колонне на тросе	Автоматизированные измерения горизонтальных смещений грунта основания	±30°	//	//
4. Скважинные автоматические пьезометры	Для определения порового давления	(от 0,1 до 5) МПа	//	//
5. Скважинные автоматические пьезометры	Для определения уровня подземных вод и температуры	(от 0,1 до 5) МПа	//	//

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
6. GPS-приемники ГЛОНАСС	Измерение перемещений конструкций здания	В плане: 10 мм По высоте: 20 мм	//	//
7. Наклономеры (датчики крена)	Измерение наклона поверхности	$(\pm 10 \dots \pm 20)^\circ$ разрешение 0,001% шкалы	//	//
8. Датчики давления на грунт	Измерение давления на грунт от фундамента (ростверка)	Струнный (от 0,3 до 5 МПа)	//	//

Основными элементами инструментального оснащения мониторингов ограждающих стен котлованов, оснований и конструкций сооружений являются:

- скважинные измерения осадок и смещений грунтов оснований (для сокращения их числа рекомендуется предусматривать измерение наклонов здания инклинометрами);
- скважинные измерения порового давления и уровня подземных вод;
- измерения нагрузок на грунт (в т.ч. на сваи), напряжений в фундаментной плите (ростверке) и сваях по их длине;
- измерения напряжений в конструкциях: стенах, пилонах и колоннах;
- измерения колебаний здания (собственных и от внешних воздействий).

Подбор конкретных измерительных средств обусловлен объемно-планировочным и конструктивным решением объекта, нагрузками, инженерно-геологическими условиями. Основой геометрии размещения инструментального оснащения служат результаты совместных расчетов статики и динамики здания и основания фундаментов.

Датчики давления (мессдозы) должны проектироваться в уровне подошвы ростверка по результатам расчетов осадок, нагрузок и моментов для фундаментной плиты (ростверка) сооружения. Расчеты показывают, что зона наибольших осадок, как правило, наблюдается в центральной части сплошных фундаментных плит (ростверков) с наибольшей областью растяжений, что в значительной мере и определяет конфигурацию расстановки датчиков напряжений и деформаций, в т.ч. скважинных датчиков осадок (суммарных и послойных), порового давления, а также датчиков давления на грунт и напряжений в плите, которые должны контролировать состояние объекта по основным осям плана, для зон разной нагруженности. Датчики давления на грунт и напряжений в плитах, колоннах, пилонах нижних этажей (для 1/3 здания) должны образовывать своеобразные поля, геометрия расположения которых определяется расчетными полями осадок, нагрузок и моментов.

В качестве регистрирующих элементов напряжений могут применяться струнно-акустические, резистивные или оптоволоконные сенсоры, устанавливаемые или внутри конструкции (до укладки бетона), или на ее поверхности (съёмные), после набора бетоном проектной прочности.

Принятые в РПГМ тензометрические датчики должны обеспечить контроль развития напряжений в конструкциях объекта с момента их возведения и на протяжении всего срока его эксплуатации.

В зависимости от материала конструктивного элемента могут использоваться различные способы монтажа тензометрических датчиков. В железобетонных конструкциях датчики устанавливаются как на арматуру каркаса, так и на бетон, непосредственно перед заливкой бетона. Датчики, устанавливаемые на арматуру, крепятся непосредственно к ней при помощи точечной сварки или болтов (при измерении напряжений в арматуре) или с помощью проволоки (при измерении напряжений в бетоне).

Для измерений следует применять средства измерений в требуемом интервале проектных параметров и имеющиеся в государственном реестре Республики Беларусь. При этом следует иметь в виду, что для мониторинга используются датчики 2-х типов, устанавливаемые как внутри тела конструкции, так и снаружи на ее поверхности. В подземной и надземной частях предпочтение следует отдавать последним. Это обусловлено тем, что если струнные датчики, датчики давления на грунт и др., устанавливаемые в теле монолитных конструкций (сваи, бетонная подготовка, ростверк, плиты перекрытий и др.), не могут быть извлечены для проведения периодической поверки юстировки и калибровки, то они автоматически исключаются из сферы законодательной метрологии после истечения срока сертификата первичной поверки и в дальнейшем могут использоваться только в качестве информационных.

Для измерения вибродинамических (в т.ч. сейсмических) колебаний рекомендуется закладывать акселерометры и регистраторы, не уступающие по качеству аналогичным системам фирмы GeoSIG-GURALP, которые обладают всем необходимым метрологическим сопровождением, позволяющим объединить их в единую систему. При использовании других типов датчиков следует учитывать, что ни один из отечественных измерителей колебаний низкочастотного диапазона (от 0,1 Гц и выше) не имеет требуемого сертификата.

При этом основными параметрами при выборе типа датчика должны быть частотный диапазон и чувствительность. Сейсмометр должен регистрировать собственные колебания основного тона и нескольких более высоких гармоник. Для большинства зданий основной тон лежит в диапазоне менее 1 Гц (обычно (0,2–0,8) Гц), частоты выше (25–30) Гц регистрировать нецелесообразно (полезный сигнал искажается промышленными и др. помехами). Поэтому оптимально использовать датчики в диапазоне частот (от 0,2 до 40) Гц. Низкочастотный диапазон дает возможность измерить даже незначительные изменения в колебаниях конструкций и позволяет оценить физические характеристики грунтов оснований в условиях их естественного залегания (модули упругости, параметры нелинейности и др.).

Целесообразно устанавливать не менее 1-го датчика на верхних этажах, не менее 2-х на фундаментной плите, подземных этажах и 1-го в грунте основания фундамента объекта в уровне подошвы ростверка, располагая их в противоположных концах плана для возможности выявления крутильных колебаний. Наблюдения должны вестись в едином времени, для чего необходимо предусмотреть синхронизацию датчиков по GPS-временным маркам.

Практика показывает, что невозможно установить датчики во всех интересующих местах и скважинах в грунте, так как для этого необходимо использовать слишком большое их количество и коммутационных комплектов, что приводит к значительной (неприемлемой) стоимости ГМ. Поэтому РПГМ должны ориентироваться на минимальное их количество. Исходя из этого, датчики следует устанавливать, как правило, в наиболее нагруженных (по результатам математического компьютерного моделирования) зонах грунтового основания и конструктивных элементах фундамента, подземной части наблюдаемого объекта, а также его первых (10–15)-ти и последних надземных этажах. На зданиях ОЗ можно ограничиться геологогеодезическими и сейсמודинамическими наблюдениями.

Заключение. На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта строительства показывает [8; 10; 12], что одной из важнейших современных проблем является обеспечение безопасности гражданских и промышленных зданий, сооружений класса сложности (K1, K2) с повышенными социальными, экономическими, летальными рисками и классами последствий (CC2, CC3), а также возводимых в сложных геотехногенных условиях. Такие объекты, как правило, не имеют аналогов, и исходя из этого их можно отнести к уникальным, не имеющим достаточной нормативно-правовой базы. В связи с этим на всех стадиях строительного процесса (инвестиций в строительство, изысканий, архитектурный и строительный проект, строительство и эксплуатация), согласно данным^{15,16}, за ними необходимо осуществлять научно-техническое сопровождение (НТСС) и геотехнический мониторинг (ГМ) для предотвращения негативных последствий в период строительства и эксплуатации.

2. Исходя из того, что в действующих отечественных ТНПА и еврокодах приводятся только концептуальные (неконкретные) сведения по осуществлению процессов НТСС и систем ГМ, в РУП «Институт БелНИИС» авторами был проведен ряд исследований и работ по их имплементации на нескольких уникальных и высотных отечественных объектах с использованием разработанных оптимальных методов наблюдений (измерений) и современных технических средств, на основе построения численных моделей наблюдаемых объектов, в т.ч. комплексного автоматизированного их мониторинга, обеспечивающих безопасность сооружений, в объеме, требуемом для разработки главы проекта по ГМ, часть результатов которых приведена в настоящей статье и вошла в ТНПА Республики Беларусь^{17,18}.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бусел И.А. Инженерно-геологические изыскания для строительства: основы методологии. – Минск: Колорград, 2020. – 393 с.
2. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Мониторинг возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами. – Минск: БНТУ, 2016. – 330 с.
3. Неразрушающие методы испытания бетона / О.В. Лужин, В.А. Волохов, Г.Б. Шмаков. – М.: Стройиздат, 1985. – 177 с.
4. Гурьев В.В., Дорофеев В.М. Современная нормативная база по мониторингу технического состояния зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – № 4. – С. 24–25.
5. Скрамтаев Б.Г., Лещинский И.Ю. Испытание прочности бетона в образцах, изделиях, сооружениях. – М.: Стройиздат, 1964. – 176 с.
6. Информационно-измерительная техника и технология / В.И. Калашников, С.В. Нефедов, А.Б. Путилин. – М.: Высш. шк., 2002. – 454 с.
7. Нормативное обеспечение создания автоматизированных систем технического диагностирования строительных конструкций / Ю.И. Немчинов, А.К. Хавкин, В.П. Глуховский и др. // Світ геотехніки. – 2004. – № 4. – С. 19–22.
8. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Геотехническое сопровождение развития городов (практическое пособие по проектированию зданий и подземных сооружений в условиях плотной застройки). – СПб.: Стройиздат Северо-Запад, Группа компаний «Геореконструкция», 2010. – 551 с.
9. Методы и результаты сейсмического мониторинга взаимодействия высотных зданий с грунтами оснований : в 2 ч. / С.В. Николаев, В.М. Острцов, Л.Б. Гендельман и др. // Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан. – М.: МСГУ, 2005. – Ч. 1. – С. 166–173.
10. Катценбах Р., Шмитт А., Рамм Х. Основные принципы проектирования и мониторинга высотных зданий Франкфурта-на-Майне. Случаи из практики // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2005. – № 9. – С. 80–99.
11. Контроль качества геотехнических конструкций, созданных методом струйной цементации / А.В. Черняков, О.В. Богомолова, В.В. Капустин и др. // Технологии сейсморазведки. – 2008. – № 3. – С. 97–103.
12. Гурьев В.В., Дорофеев В.М. Мониторинг напряженно-деформируемого состояния несущих конструкций высотных зданий // Стройбезопасность. – 2005. – С. 18–21.
13. Острцов В.А., Вознюк А.Б., Капустян Н.К. Опыт мониторинга конструкций и грунтов оснований высотных зданий в Москве // Строительная наука и техника. – 2008. – № 5(20). – С. 99–101.

¹⁵ См. сноску 1.

¹⁶ См. сноску 2.

¹⁷ См. сноску 1.

¹⁸ См. сноску 2.

REFERENCES

1. Busel, I.A. (2020). *Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva: osnovy metodologii*. Minsk: Kolorgrad. (In Russ.).
2. Snezhkov, D.Yu. & Leonovich, S.N. (2016). *Monitoring vozvodimyykh i ekspluatiruemyykh zhelezobetonnykh konstruktssii nerazrushayushchimi metodami*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
3. Luzhin, O.V., Volokhov, V.A. & Shmakov, G.B. (1985). *Nerazrushayushchie metody ispytaniya betona*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
4. Gur'ev, V.V. & Dorofeev, V.M. (2006). *Sovremennaya normativnaya baza po monitoringu tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, (4), 24–25. (In Russ.).
5. Skramtaev, B.G. & Leshchinskii, I.Yu. (1964). *Ispytanie prochnosti betona v obraztsakh, izdeliyakh, sooruzheniyakh*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
6. Kalashnikov, V.I., Nefedov, S.V. & Putilin, A.B. (2002). *Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika i tekhnologiya*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
7. Nemchinov, Yu.I., Khavkin, A.K., Glukhovskii, V.P., Yurov, A.N., Priemskii, V.D. & Radishchev, Yu.V. (2004). *Normativnoe obespechenie sozdaniya avtomatizirovannykh sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya stroitel'nykh konstruktssii. Svit geotekhniki*, (4), 19–22. (In Russ.).
8. Ulitskii, V.M., Shashkin, A.G. & Shashkin, K.G. (2010). *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie razvitiya gorodov (prakticheskoe posobie po proektirovaniyu zdaniy i podzemnykh sooruzheniy v usloviyakh plotnoi zastroiki)*. Saint-Petersburg: Stroiizdat Severo-Zapad, Gruppa kompanii «Georekonstruktsiya». (In Russ.).
9. Nikolaev, S.V., Ostretsov, V.M., Gendel'man, L.B., Voznyuk, A.B., Kapustyan, N.K. & Nesterkina, M.A. (2005). *Metody i rezul'taty seismicheskogo monitoringa vzaimodeystviya vysotnykh zdaniy s gruntami osnovanii: v 2 ch. Ch. 1. Gorodskoi stroitel'nyi kompleks i bezopasnost' zhizneobespeche-niya grazhdan* (166–173). Moscow: MSGU. (In Russ.).
10. Katsenbakh, R., Shmitt, A. & Ramm, Kh. (2005). *Osnovnye printsipy proektirovaniya i monitoringa vysotnykh zdaniy Frankfurta-na-Maine. Sluchai iz praktiki. Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, (9), 80–99. (In Russ.).
11. Chernyakov, A.V., Bogomolova, O.V., Kapustin, V.V., Vladov, M.L. & Kalinin, V.V. (2008). *Kontrol' kachestva geotekhnicheskikh konstruktssii, sozdannykh metodom struinoi tsementatsii. Tekhnologii seismorazvedki*, (3), 97–103. (In Russ.).
12. Gur'ev, V.V. & Dorofeev, V.M. (2005). *Monitoring napryazhenno-deformiruemogo sostoyaniya nesushchikh konstruktssii vysotnykh zdaniy. Stroibezopasnost'*, 18–21. (In Russ.).
13. Ostretsov, V.A., Voznyuk, A.B. & Kapustyan, N.K. (2008). *Opyt monitoringa konstruktssii i gruntov osnovanii vysotnykh zdaniy v Moskve. Stroitel'naya nauka i tekhnika*, 5(20), 99–101. (In Russ.).

Поступила 04.07.2024

**IMPLEMENTATION OF THE PROCESS OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT
OF CONSTRUCTION AND GEOTECHNICAL MONITORING SYSTEM
DURING CONSTRUCTION AND OPERATION OF STRUCTURES**

V. KRAVTSOV¹⁾, S. EGHBALNIK²⁾

(¹⁾ Institute BelNIIS RUE, Minsk, ²⁾ Belarusian National Technical University, Minsk)

A wide range of issues of organisation and provision of scientific and technical support of construction (STSC) and its main component – geotechnical monitoring (GM) carrying out, in particular, quality control of the enclosing walls of excavations, bases, foundations, above-ground structures of erected, operated, structures, adjacent territories and surrounding existing buildings. The basics of modern methods of observations (measurements), technical means (sensors, devices, etc.) used for this purpose are described, the principles of complex, including automated, monitoring based on a numerical model of the object are considered, providing construction safety based on the results of measurements of controlled parameters in the volume required for the development of the project chapter on GM. The data on purposes, composition, technical equipment, system (general) and working programmes of geotechnical monitoring on the basis of researches and accumulated experience of its carrying out for the condition of high-rise and unique objects are given.

Keywords: safety, regulations and means of observations over the state of the controlled object (NTSS, GM), system of simple and complex automated monitoring, GM programmes, legal metrology.

ТЯЖЕЛЫЙ БЕТОН МОРОЗОСТОЙКОСТЬЮ F400 С КОМПЛЕКСНЫМИ ХИМИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

**В.В. МАРКОВЦОВА¹⁾, канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА²⁾,
канд. техн. наук, доц. Л.В. ЗАКРЕВСКАЯ³⁾**

^(1), 2) Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
³⁾ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых)

В статье представлены результаты исследований влияния комплексных химических добавок на физико-механические свойства бетонов с учетом условий твердения. Экспериментально подтверждено, что комплексная добавка: гиперпластификатор Хидетал ГП-9-Альфа, 0,7% от массы цемента, и воздухововлекающая добавка Хидетал П8, 0,05% от массы цемента, позволяет получить бетон с более плотной структурой, способствует одинаково активному набору прочности бетона в ранние сроки в воздушно-сухих условиях твердения и при низкотемпературной тепловлажностной обработке, в возрасте 28 суток при твердении в условиях тепловлажностной обработки обеспечивает увеличение прочности бетона на 15%. Представлены новые экспериментальные данные об эффективности совместного использования гиперпластификатора Хидетал ГП-9-Альфа и воздухововлекающей добавки Хидетал П8 для получения бетонов класса C32/40 маркой по морозостойкости F 400.

Ключевые слова: тяжелые бетоны, физико-механические свойства, состав бетона, гиперпластификатор, воздухововлекающая добавка, комплексный модификатор, морозостойкость, ускоренный метод.

Введение. Разработка составов тяжелого бетона с повышенной эксплуатационной надежностью, т.е. высокой прочностью и повышенной морозостойкостью, на основе местных сырьевых ресурсов и широкой номенклатуры гиперпластификаторов и воздухововлекающих добавок, является сложной и многофакторной задачей для заводов ЖБИ, несмотря на известные физические и технологические основы проектирования составов, изложенные в работах Шейкина А.Е., Добшица Л.М., Кунцевича О.В., Миронова С.А. Шестоперова С.В. [1–5]. Анализ исследований [1–5] показывает, что морозостойкость цементного камня и бетона зависит от поровой структуры материала, а основными факторами, влияющими на ее формирование, являются: водоцементное соотношение, вид и характеристики цемента и заполнителя, режимы и условия твердения. Исследования, представленные в работах¹ [6–9], подтверждают, что для обеспечения морозостойкости структура бетона должна быть наполнена достаточным количеством резервных пор, а цементный камень и заполнитель, а также контактная зона по поверхности их раздела должны обладать необходимой прочностью, обеспечивающей сопротивление возникающим в бетоне деформациям. Ковшар С.Н.² анализируя влияние циклического замораживания и оттаивания на степень гидратации цемента делает вывод, что «интенсивность развития степени гидратации во времени прямо определяется величиной водоцементного отношения, а следовательно, и первоначальным запасом клинкера». Также установлено³, что кинетика изменения прочности цементного камня согласуется с изменением степени гидратации и среднего размера открытых капиллярных пор. По данным Несветаева Г.В. [6], условно закрытая пористость для бетонов с высокой морозостойкостью должна составлять не менее 3,5%, а величина открытой пористости не должна превышать 7%.

Приведенные в работе Красовского П.С. [7] положения свидетельствуют о том, что в структуре цементного камня можно выделить группу мелких пор размером 250–300 Å и группу капиллярных пор размером 0,1–1 мк. Отмечается [7], что размер и количество мелких пор определяется условиями формирования структуры, а размер и количество капиллярных пор зависит от удельной поверхности цемента, водоцементного отношения и времени твердения. Добшиц Л.М. [8], анализируя пути повышения долговечности бетона, подчеркивает, что «на величину морозостойкости бетонов оказывает влияние целый ряд факторов, однако определяющим является соотношение между объемами условно замкнутых и интегральных пор».

Влияние характеристик цемента на формирование пористости цементного камня изучалось Мироновым С.А., который в работе [4] отмечает, что наиболее морозостойким является портландцемент, содержащий 47–61% трехкальциевого силиката и 5–8% трехкальциевого алюмината, при этом глиноземистый и пуццоланизированные портландцементы показывают худшие результаты. Согласно Горчакову Г.И. [9], удельная поверхность цемента должна находиться в пределах 2800–3500 см²/г, также отмечается, что увеличение удельной поверхности приводит к снижению морозостойкости. Это подтверждено Шейкиным А.Е. [1], который экспериментально установил, что морозостойкость цементного камня снижается при использовании тонкомолотых цементах с удельной поверхностью равной 5000–6000 см²/г.

¹ Ковшар С.Н. Оценка и прогнозирование морозо- и солестойкости тяжелого бетона с учетом изменения конструктивных и деструктивных факторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / БНТУ. – Минск, 2010. – 23 с. – URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/3475>.

² См. сноску 1.

³ См. сноску 1.

Научные исследования свидетельствуют о снижении морозостойкости бетона, подвергнутого тепловлажностной обработке, в сравнении с бетонами нормального твердения. По мнению Малининой Л.А. [10], морозостойкость определяется в первую очередь структурой бетона, а тепловая обработка изменяет ее, в большинстве случаев увеличивая общую пористость, делая поры сообщающимися. В работе [11] установлено, что общая пористость бетона, подвергнутого пропариванию, выше на 10,3÷21,6% относительно пористости непропаренных бетонов. На величину пористости влияет время предварительного выдерживания до пропаривания, скорости подъема температуры, температуры изотермического прогрева⁴ [10; 11].

Одним из требований к составу бетонов марок по морозостойкости F400 и F500, согласно рекомендациям⁵, является снижение расхода воды и обеспечение необходимого воздухоудержания, которое может быть достигнуто путем ввода химических добавок, пластифицирующего и воздухововлекающего действия. Исследованиями [12; 13] показано, что эффективными пластифицирующими добавками, снижающими водопотребность на 30% и более являются гиперпластификаторы. Особенностью гиперпластификаторов разных производителей являются различия в структуре молекул и химическом составе [13], отмечается также, что поликарбоксилаты обладают заметным воздухововлекающим действием, содержание воздуха в бетонной смеси может достигать 5% и более. В работе Шулдякова К.В.⁶ установлено, что замена пластификатора на основе нафталинформальдегида на пластификатор на основе поликарбоксилата обеспечивает увеличение марки по морозостойкости на 37%, обеспечивая получение марки по морозостойкости до F500. Экспериментальные данные [14] свидетельствуют о том, что бетон без воздухововлекающей добавки, но с использованием эффективного пластификатора Реламикс ПК, обеспечивал существенный рост плотности, непроницаемости и прочности и после 50...55 циклов снизил прочность до уровня 40...45 МПа. В работе [15] исследовалась морозостойкость цементного камня на основе цемента четырех заводов со следующими пластифицирующими добавками: Glenium 115 (на основе эфиров поликарбоксилатов), Glenium ACE 430 (на основе эфиров поликарбоксилатов), Glenium 323 MIX (на основе эфиров поликарбоксилатов и лигносульфонатов), Reobuild 181k (на основе нафталинсульфоната). Полученные результаты показали, что пластифицирующие добавки по-разному влияют на открытую и условно закрытую (резервную) пористость в зависимости от цемента, при этом явной зависимости пористости и морозостойкости нет [15]. Таким образом, при применении гиперпластификаторов с целью получения заданной морозостойкости требуется проведение исследований по установлению их влияния на свойства цементных композиций.

Целью данной научно-исследовательской работы является разработка на основе сырьевых материалов филиала «Новополоцкжелезобетон» ОАО «Кричевцементношифер» составов модифицированных бетонов класса C32/40 и маркой по морозостойкости F 400 с изучением влияния комплексных добавок, состоящих из пластифицирующего и воздухововлекающего компонентов, и режимов твердения на прочностные характеристики бетона.

Характеристика материалов и методика проведения исследований. Для проведения исследований использовались материалы, которые применяются на филиале «Новополоцкжелезобетон» ОАО «Кричевцементношифер» для изготовления сборных железобетонных конструкций. Вяжущее: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Кричевцементношифер» по ГОСТ 31108-2020. Физико-механические характеристики портландцементов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Физико-механические характеристики портландцементов

Класс портландцемента	НГЦТ, %	Группа эффективности пропаривания	Средняя активность при пропаривании, МПа	Сроки схватывания, ч-мин		Минералогический состав клинкера, %			
				начало	конец	C ₃ S	C ₃ A	C ₂ S	C ₄ AF
ЦЕМ I 42,5Н	27,25	I	33,6	2 ²⁰	5 ⁰⁰	64,4	6,1	14,1	11,2

Мелкий заполнитель: природный песок карьера «Боровое» производства филиала «Новополоцкжелезобетон» ОАО «Кричевцементношифер» по ГОСТ 8736-2014, насыпная плотность 1507 кг/м³, плотность зерен 2450 кг/м³, содержание пылеватых и глинистых частиц 2,40%, пустотность 39,2%, влажность 3,2%, песок относится к группе средних, класс II, модуль крупности M_{кр}=2,20.

Крупный заполнитель: щебень фракции 5-20 производства РУПП «Гранит» по ГОСТ 8267-93, насыпная плотность 1415 кг/м³, марка щебня по прочности (дробимость) 1400, содержание пылеватых и глинистых частиц 0,9%,

⁴ Торопова М.В. Влияние тепловлажностной обработки на структурообразование и эксплуатационные свойства бетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Иваново, 2002. – 19 с.

⁵ Указания по повышению морозостойкости транспортных сооружений. Рекомендации по приготовлению бетонов марок F400 и F500 для сборных конструкций, насыщаемых пресной водой / Орден Октябрьской революции научно-исследовательским институтом (НИИТСом); канд. техн. наук В.С. Гладков. – М.: Транстрой, 1993. – 33 с.

⁶ Шулдяков К.В. Тяжелые бетоны, стойкие к циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Пенза, 2021. – 24 с.

содержание зерен пластинчатой и игольчатой формы 20,2%, марка по морозостойкости 300, щебень относится к 3 группе щебня по содержанию зерен пластинчатой и игольчатой формы.

Для затворения цементного теста и бетонной смеси использовалась вода, соответствующая требованиям СТБ 1114-98.

В качестве модифицирующих добавок использовались гиперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилата Хидетал ГП-9-Альфа по ТУ ВУ 490681049.005-2012 и Стахемент-2000М по ТУ ВУ 800013176.004-2011, воздухововлекающие добавки Хидетал П8 по ТУ ВУ 490681049.003-2012 и Микропоран по ТУ ВУ 800013176.002-2011, гидроизоляционная добавка Пенетрон Адмикс по ТУ ВУ 191081376.001-2015.

Для проведения исследований изготавливались образцы-кубы с ребром 100 мм. Прочность бетона на сжатие определялась по ГОСТ 10180-2012, подвижность бетонной смеси – по ГОСТ 10181-2014. По истечению 28 суток образцы-кубы испытывались на морозостойкость по третьему ускоренному методу. Образцы бетона перед испытанием на морозостойкость насыщались 5%-ным водным раствором хлористого натрия при температуре $(18 \pm 2) ^\circ\text{C}$ по 4.11 ГОСТ 10060.0-95 в ванне для насыщения и оттаивания образцов (рисунок 1). Контрольные образцы через 2–4 ч после извлечения из раствора испытывались на сжатие. Основные образцы после насыщения подвергались испытаниям на замораживание и оттаивание. Для проведения испытаний использовался морозильник компрессионный ММ-164-80 МКШ-240. Для хранения контрольных образцов-кубов в течение 28 суток использовалась камера нормального твердения (КНТ) (рисунок 2). Взвешивание образцов выполнялось на технических электронных весах AD 05H. Перемешивание бетонной смеси производилось с использованием лабораторного бетоносмесителя LC Technic на 20 литров принудительного действия. Для определения прочности на сжатие использовались: пресс гидравлический П-125.



Рисунок 1. – Ванна для насыщения и оттаивания образцов



Рисунок 2. – Камера нормального твердения

Результаты и их обсуждение. Подбор состава бетона выполнялся в соответствии с нормативной документацией и требованиями к бетону, обеспечивающими класс С32/40 F400 для изготовления изделий, применяемых в климатических условиях, характеризующихся средней температурой наружного воздуха наиболее холодной пятидневкой в районе строительства ниже минус $40 ^\circ\text{C}$. Согласно СТБ 1544-2005, бетон класса С32/40 может применяться для сооружения объектов, эксплуатация которых подразумевает воздействие существенных нагрузок механического характера, таких как мостовые сооружения, эстакады для автомобильного транспорта, несущие конструкции в виде колонн, балок, перемычек и т.д. При подборе состава бетонных смесей были приняты во внимание вопросы обеспечения минимального расхода цемента из условий снижения энергоемкости и стоимости смеси, обеспечения удобоукладываемости, высокой плотности и прочности бетона на сжатие. Подобранный состав бетонной смеси, принятый в качестве контрольного состава, приведен в таблице 2.

Таблица 2. – Контрольный состав бетонной смеси

Обозначение состава	Расход материалов, кг/м ³				Расчетная плотность, кг/м ³	В/В
	портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	песок Мк=2,2	щебень гранитный, фр. 5-20 мм, F300	Вода		
КБ	410	770	1050	200	2430	0,49

С целью получения бетонов с высокой морозостойкостью исследовались в качестве модификаторов комплексы добавок, включающие гиперпластификатор и воздухововлекающую добавку. Применение в исследованиях воздухововлекающих добавок в комплексе с гиперпластификаторами обусловлено механизмом действия воздухововлекающих добавок. Известно, что воздухововлекающие добавки не только гидрофобизируют поры и капилляры бетона, но способствуют формированию пор, размерами 50–250 мкм. Такие поры не заполняются водой при общем водопоглощении, но могут служить «резервными емкостями» для гашения внутренних напряжений, возникающих при замерзании воды. Воздухововлекающие добавки уменьшают расслоение бетонных смесей при их транспортировании, укладке и уплотнении [13].

Исследовалось водоредуцирующее действие комплексных химических добавок следующего состава:

- комплексная добавка № 1 (КМ № 1): Стахемент 2000М (гиперпластификатор), 1,0% от массы цемента; Микропоран (воздухововлекающая добавка), 0,15% от массы цемента;
- комплексная добавка № 2 (КМ № 2): Хидетал ГП-9-Альфа (гиперпластификатор), 0,7% от массы цемента; Хидетал П8 (воздухововлекающая добавка), 0,05% от массы цемента;
- комплексная добавка № 3 (КМ № 3): Хидетал ГП-9-Альфа (гиперпластификатор), 1,0% от массы цемента; Хидетал П8 (воздухововлекающая добавка), 0,05% от массы цемента; Пенетрон Адмикс (гидроизоляционная добавка), 1,3% от массы цемента.

Подвижность бетонных смесей, модифицированных комплексными добавками, определялась по ГОСТ 10181. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Влияние комплексных добавок на подвижность бетонной смеси

Состав бетонной смеси	обозначение	Комплексная химическая добавка компонентный состав кг/м ³ (% от массы цемента)					Осадка конуса, см	Марка по подвижности
		Хидетал ГП-9-Альфа	Хидетал П8	Стахемент 2000М	Микро-поран	Пенетрон Адмикс		
КБ	-	-	-	-	-	-	5	П2
КБ	КМ № 1	-	-	4,10 (1,0)	0,62 (0,15)	-	21	П5
КБ	КМ № 2	2,87 (0,7)	0,205 (0,05)	-	-	-	23	П5

Полученные экспериментальные данные показали, что введение в состав бетонной смеси комплексных добавок КМ № 1 и КМ № 2, состоящих из гиперпластификатора и воздухововлекающей добавки, позволяет увеличить подвижность бетонной смеси с 5 см (состав КБ) соответственно до 21 см и 23 см (КБ+КМ № 1, КБ+КМ № 2). Водоредуцирующее действие комплексных добавок использовали для снижения количества воды затворения. Составы бетонной смеси были откорректированы путем снижения количества воды затворения до уровня водовяжущего отношения В/В = 0,39 и корректировки расхода цемента. Таким образом, для проведения дальнейших исследований использовались три состава бетонных смесей: состав КБ1 с расходом цемента 410 кг/м³, состав КБ2 с расходом цемента 450 кг/м³, состав КБ3 с расходом цемента 400 кг/м³. Составы бетонных смесей после корректировки приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Составы бетонных смесей с учетом водоредуцирующего действия комплексных химических добавок

Обозначение состава	Расход материалов, кг/м ³				Расчетная плотность, кг/м ³	В/В
	портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	песок Мк=2,2	щебень гранитный, фр. 5–20 мм, F300	Вода		
КБ1	410	874	1050	160	2494	0,39
КБ2	450	800	1050	175	2475	0,39
КБ3	400	890	1050	155	2495	0,39

Результаты определения подвижности бетонных смесей откорректированных составов при введении комплексных химических добавок представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Подвижность модифицированных бетонных смесей со сниженным водовяжущим отношением

Обозначение состава	Обозначение комплексной химической добавки	Компонентный состав комплексной химической добавки, кг/м ³ (% от массы цемента)					Осадка конуса, см	Марка по подвижности
		Хидетал ГП-9-Альфа	Хидетал П8	Стахемент 2000М	Микропоран	Пенетрон Адмикс		
КБ1	КМ № 1	-	-	4,10 (1,0)	0,62 (0,15)	-	7	П2
КБ1	КМ № 2	2,87 (0,7)	0,205 (0,05)	-	-	-	8	П2
КБ2	КМ № 2	3,15 (0,7)	0,225 (0,05)	-	-	-	8	П2
КБ3	КМ № 3	4,00 (1,0)	0,20 (0,05)	-	-	5,20 (1,3)	5	П2

Полученные результаты показали, что после снижения водовяжущего отношения с $B/B = 0,49$ до $B/B = 0,39$ осадка конуса бетонных смесей при введении комплексных химических добавок, содержащих гиперпластификатор и воздухововлекающую добавку, составляет 7–8 см, что обеспечивает требуемые технологические свойства бетонной смеси. Увеличение в составе КБ2 содержания цемента до 450 кг/м^3 незначительно повлияло на подвижность бетонной смеси, которая по сравнению с составом КБ1, содержащим 410 кг/м^3 , увеличилась на 1 см. Уменьшение в составе КБ3 содержания цемента до 400 кг/м^3 привело к снижению подвижности бетонной смеси до 5 см.

Далее были проведены испытания по определению прочности бетона на сжатие в возрасте 7, 14 и 28 суток. Перед испытанием образцы взвешивались, определялись их геометрические размеры и рассчитывалась плотность бетона. Твердение образцов осуществлялось в следующих условиях:

- воздушно-сухие условия при температуре $t=18-20 \text{ }^\circ\text{C}$, влажности 60% (ВСУ);
- тепловлажностная обработка 10 часов по режиму 4+3+3: 4 часа – предварительная выдержка, 3 часа – подъем температуры, 3 часа – изотермический прогрев при температуре $t=60 \text{ }^\circ\text{C}$ (ТВО);
- нормально-влажностные условия при температуре $t=18 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности 90% в камере нормально-влажностного твердения (НВУ).

Результаты определения плотности и прочности на сжатие модифицированных бетонов представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Влияние комплексных добавок и режимов твердения на прочность и плотность бетона

Обозначение состава	Комплексная химическая добавка	Режим твердения	Плотность, кг/м^3 , в возрасте, суток			Прочность на сжатие, МПа (% от $R_{28 \text{ сут.}}$)		
			7	14	28	% от $R_{\text{контр}}$, в возрасте, суток		
КБ1	-	НВУ	2485	2488	2490	25,80 (51,6)	33,81 (67,6)	49,98 (100,00)
						100	100	100
КБ1	КМ № 1	ВСУ	2447	2449	2450	28,87 (51,2)	34,17 (60,6)	56,42 (100)
						111,9	101,09	112,98
		ТВО	2488	2490	2494	36,9 (65,1)	48,37 (85,4)	56,66 (100)
						143,0	143,1	113,4
КБ1	КМ № 2	ВСУ	2410	2415	2418	37,91 (66,9)	46,34 (81,8)	56,66 (100)
						146,9	137,1	113,4
		ТВО	2494	2492	2496	40,98 (71,1)	49,51 (85,9)	57,62 (100)
						158,8	146,4	115,3
КБ2	КМ № 2	ВСУ	2482	2484	2488	33,47 (61,4)	42,82 (78,6)	54,50 (100)
						129,7	126,6	109,0
		ТВО	2520	2518	2522	40,2 (73,5)	44,87 (82,1)	54,66 (100)
						155,8	132,7	109,4
КБ3	КМ № 3	ВСУ	2430	2432	2434	27,7 (53,1)	32,52 (62,3)	52,20 (100)
						107,4	96,2	104,4
		ТВО	2486	2488	2492	32,84 (62,8)	41,87 (80,1)	52,24 (100)
						127,4	123,8	104,5

Анализ полученных результатов показывает, что режимы твердения оказывают влияние на интенсивность набора прочности в ранние сроки твердения. Так, прочность бетона КБ1 с комплексной добавкой КМ № 1 в возрасте 7 и 14 суток при твердении в воздушно-сухих условиях составила 51,2% и 60,6% соответственно, а при твердении в условиях ТВО составила 65,1% и 85,4% соответственно.

Наибольшую эффективность при ТВО обеспечивает комплексная химическая добавка КМ № 2. Через 7 сут. и 14 сут. бетоны состава КБ1 и КБ2, модифицированные комплексной химической добавкой КМ № 2, после ТВО показали соответственно 71,1% и 85,9%; 73,5% и 82,1% от прочности бетона в возрасте 28 сут. Также установлено, что при применении комплексной химической добавки КМ № 2 условия твердения не оказывают существенного влияния на интенсивность набора прочности бетона. Так, прочность бетона КБ1 с комплексной добавкой КМ № 2 в возрасте 7 и 14 суток при твердении в воздушно-сухих условиях составила 66,9% и 81,8% соответственно, а при твердении в условиях ТВО составила 71,1% и 85,9% соответственно, разница между значениями прочности составила 4,2% и 4,1% соответственно.

Влияние условий твердения увеличивается при увеличении доли цемента в составе бетона. Так, прочность бетона КБ2 с комплексной добавкой КМ № 2 в возрасте 7 и 14 суток при твердении в воздушно-сухих условиях составила 61,4% и 78,6% соответственно, а при твердении в условиях ТВО составила 73,5% и 82,1% соответственно, при этом разница между значениями прочности увеличилась и составила 12,1% и 3,5%.

Исследуемые комплексы химических добавок обеспечивают разную интенсивность набора прочности бетона в ранние сроки твердения. Прочность бетона в возрасте 7 суток при твердении в воздушно-сухих условиях увеличивается от 7,4% при использовании комплексной добавки КМ № 3 до 46,9% при использовании комплексной добавки КМ № 2. Прочность бетона в возрасте 7 суток при твердении в условиях ТВО увеличивается от 27,4% при использовании комплексной добавки КМ № 3 до 58,8% при использовании комплексной добавки КМ № 2.

Комплексные химические добавки обеспечивают повышение прочности бетона в возрасте 28 суток, при этом условия твердения не оказывают существенного влияния. Так, прочность бетона на сжатие в возрасте 28 сут. с комплексными добавками КМ № 1, КМ № 2, КМ № 3 увеличивается на 13%, 9–15%, 4% соответственно.

По значениям прочности бетона на сжатие в возрасте 28 суток определены следующие классы бетона:

- С30/37 – бетон без комплексной добавки;
- С32/40 – бетоны с комплексными добавками при режиме твердения ВСУ;
- С32/40 – бетон с комплексными добавками при режиме твердения ТВО.

Таким образом, модификация бетона комплексными добавками при твердении в воздушно-сухих условиях и в условиях тепловлажностной обработки позволила повысить класс бетона по прочности на сжатие, по сравнению с немодифицированным бетоном.

Проведенные исследования показали, что комплексные химические добавки оказывают водоредуцирующее действие, и при снижении водоцементного отношения с 0,49 до 0,39 подвижность модифицированных бетонных смесей разработанных составов находится в пределах от 5 до 8 см по осадке конуса при рекомендуемом значении⁷ не более 6 см. Для проведения дальнейших исследований все составы были откорректированы под осадку конуса бетонной смеси 5 см, что обеспечит соблюдение технологических параметров бетонной смеси и позволит дополнительно уменьшить водоцементное отношение, величина которого, как показано в работе⁸, влияет на количество макропор, а следовательно, и на стойкость бетона к морозной деструкции. Составы бетонных смесей после корректировки по удобоукладываемости по осадке конуса представлены в таблице 7.

Таблица 7. – Составы бетонных смесей для испытаний на морозостойкость

Обозначение состава	Расход материалов, кг/м ³				В/В	Химические добавки, кг/м ³ (% от массы цемента)				
	портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	песок Мк=2,2	щебень гранитный, фр. 5–20 мм, F300	Вода		Хидетал ГП-9-Альфа	Хидетал П8	Стакемент 2000М	Микропоран	Пенетрон Адмикс
КБ1	410	874	1050	160	0,39	-	-	-	-	-
КБ1+КМ № 1	410	884	1050	155	0,37	-	-	4,10 (1,0%)	0,62 (0,15%)	-
КБ3+КМ № 3	400	890	1050	155	0,39	4,00 (1,0%)	0,20 (0,05%)	-	-	5,20 (1,3%)
КБ2+КМ № 2	450	855	1050	148	0,33	3,15 (0,7%)	0,225 (0,05%)	-	-	-
КБ1+КМ № 2	410	900	1050	140	0,34	2,87 (0,7%)	0,205 (0,05%)	-	-	-

Для определения морозостойкости бетона изготавливались образцы-кубики с ребром 100 мм, которые твердели в условиях ТВО 14 (4+3+5+2) и через 28 суток испытывались на морозостойкость по ГОСТ 10060.0-95, ГОСТ 10060.2-95. Образцы перед испытанием насыщались 5%-ным водным раствором хлористого натрия. Контрольные образцы бетона после насыщения испытывались на сжатие по ГОСТ 10180. Основные образцы модифицированного бетона после насыщения подвергались замораживанию и оттаиванию, число циклов определяли по таблице 3 ГОСТ 10060.0-95. Результаты испытаний на морозостойкость представлены в таблице 8.

⁷ См. сноску 5.

⁸ См. сноску 1.

Таблица 8. – Влияние комплексных химических добавок на морозостойкость бетона

Обозначение состава	Прочность на сжатие, МПа		Величина снижения прочности на сжатие, %		Соответствие СТБ 1544-2005
	контрольных образцов	после испытаний на морозостойкость F400	нормированное значение	фактическое значение	
КБ1	50,2	21,6	5	42,18	Не соотв.
КБ1+КМ № 1	56,6	42,4	5	25,1	Не соотв.
КБ3+КМ № 3	52,4	26,3	5	49,8	Не соотв.
КБ2+КМ № 2	54,6	54,8	5	-	Соотв.
КБ1+КМ № 2	57,0	55,1	5	3,3	Соотв.

В процессе испытаний на образцах-кубиках из бетона составов КБ1+КМ № 1 и КБ3+КМ № 3 появились трещины и сколы, шелушение ребер. После обнаружения данных дефектов испытания согласно ГОСТ 10060.0-95 были прекращены. Внешний вид образцов представлен на рисунке 3.



а



б

Рисунок 3. – Состояние образцов-кубов после замораживания и оттаивания в течение 400 циклов для бетона, не прошедших испытания, для составов: а – КБ1+КМ № 1; б – КБ3+КМ № 3

Испытания на морозостойкость показали, что 400 циклов замораживания-оттаивания прошли бетоны, модифицированные комплексной добавкой, включающей Хидетал ГП-9-Альфа в количестве 0,7% от массы цемента и Хидетал П8 в количестве 0,05% от массы цемента в составе.

При допустимом по ГОСТ 10060.0-95 снижении прочности на сжатие 5% после 400 циклов замораживания-оттаивания снижение прочности на сжатие для составов КБ1+КМ № 2 и КБ2+КМ № 2 составило соответственно 3,3% и без снижения. Таким образом, составы бетонов КБ1+КМ № 2 и КБ2+КМ № 2 могут быть рекомендованы для изготовления бетонных и железобетонных изделий с показателем по морозостойкости F400. С точки зрения экономической целесообразности, наиболее эффективен состав КБ1+КМ № 2, где расход цемента на 9% ниже, по сравнению с составом КБ2+КМ № 2.

Закключение. Установлено, что выдерживание бетона, модифицированного комплексной добавкой «гиперпластификатор – воздухововлекающая добавка» в условиях тепловлажностной обработки позволяет повысить плотность бетона по сравнению с бетоном нормально-влажностного твердения, при этом формирование наиболее плотной структуры бетона после ТВО обеспечивает добавка Хидетал ГП-9-Альфа, 0,7% от массы цемента, в комплексе с Хидетал П8, 0,05% от массы цемента, при расходе цемента 450 кг/м³.

Комплексные добавки снижают влияние условий твердения модифицированного бетона. Бетон, модифицированный комплексной добавкой: Хидетал ГП-9-Альфа, 0,7% от массы цемента, Хидетал П8, 0,05% от массы цемента, одинаково активно набирает прочность как в воздушно-сухих условиях твердения, так и в условиях ТВО, в возрасте 7 и 14 суток разница в прочности составляет 11,9% и 9,3%. Наибольшее увеличение прочности в возрасте 28 суток – на 15%, получено для бетона, выдержанного в условиях ТВО.

Определены два состава тяжелого бетона с комплексной добавкой: гиперпластификатор Хидетал ГП-9-Альфа, 0,7% от массы цемента, и воздухововлекающая добавка Хидетал П8, 0,05% от массы цемента. Расход материалов для состава 1: портландцемент «Кричевцементношифер» ЦЕМ I 42,5Н – 450 кг/м³; песок карьера «Боровое» – 855 кг/м³; гранитный щебень карьера «Микашевичи» – 1050 кг/м³; вода – 148 кг/м³. Расход материалов для состава 2: портландцемент «Кричевцементношифер» ЦЕМ I 42,5Н – 410 кг/м³; песок карьера «Боровое» – 900 кг/м³; гранитный щебень карьера «Микашевичи» – 1050 кг/м³; вода – 140 кг/м³. Составы позволяют получить тяжелый бетон класса С32/40, марки по морозостойкости F 400.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. – Л.: Стройиздат, 1989. – 128 с.
2. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. – Л.: Стройиздат, 1983. – 132 с.
3. Добшиц Л.М. Морозостойкость бетонов транспортных сооружений: учебное пособие. – М.: МИИТ, 1999. – 236 с.
4. Миронов С.А., Лагойда А.В. Бетоны, твердеющие на морозе. – М.: Стройиздат, 1975. – 263 с.
5. Шестоперов С.В. Технология бетона. – М.: Стройиздат, 1977. – 432 с.
6. Несветаев Г.В. Бетоны: учебно-справочное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. – 381 с.
7. Красовский П.С. Физико-химические основы формирования структуры цементных бетонов: учебное пособие. – Хабаровск: ДВГУПС, 2013. – 204 с.
8. Добшиц Л.М. Пути повышения долговечности бетонов // Строительные материалы. – 2017. – № 10. – С. 4–9.
9. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с.
10. Малинина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. – М.: Стройиздат, 1977. – 158 с.
11. Плотникова Л.Г., Пичугин А.П., Веригин Ю.А. Влияние тепловой обработки на пористость бетона // Ползуновский Вестник. – 2012. – №1/2. – С. 93–97. – URL: https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2012_01_2/pdf/093plotnikova.pdf.
12. Тараканов О.В. Химические добавки в растворы и бетоны: моногр. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 156 с.
13. Юхневский П.И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2013. – 308 с.
14. Батыновский Э.И., Гуриненко Н.С., Корсун А.Н. Повышение морозостойкости цементного бетона // Механика в технологиях илмий журналы. – 2022. – № 2(7). – С. 148–159.
15. О морозостойкости бетонов с суперпластификаторами [Электронный ресурс] / Г.В. Несветаев, И.В. Корчагин, Ю.Ю. Лопатина и др. // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Т. 8, № 5. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN516.pdf>.

REFERENCES

1. Sheikin, A.E. & Dobshits, L.M. (1989). *Tsementnye betony vysokoi morozostoikosti*. Leningrad: Stroiizdat. (In Russ.).
2. Kuntsevich, O.V. (1983). *Betony vysokoi morozostoikosti dlya sooruzhenii Krainego Severa*. Leningrad: Stroiizdat. (In Russ.).
3. Dobshits, L.M. (1999.) *Morozostoikost' betonov transportnykh sooruzhenii: uchebnoe posobie*. Moscow: MIIT. (In Russ.).
4. Mironov, S.A. & Lagoida, A.V. (1975). *Betony, tverdeyushchie na morose*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
5. Shestoperov, S.V. (1977). *Tekhnologiya betona*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
6. Nesvetaev, G.V. (2013). *Betony: uchebno-spravochnoe posobie*. Rostov-na-Donu: Feniks. (In Russ.).
7. Krasovskii, P.S. (2013). *Fiziko-khimicheskie osnovy formirovaniya struktury tsementnykh betonov: ucheboe posobie*. Khabarovsk: DVGUPS. (In Russ.).
8. Dobshits, L.M. (2017). Puti povysheniya dolgovechnosti betonov [Ways to improve the durability of concretes]. *Stroitel'nye Materialy*, (10), 4–9. (In Russ., abstr.in Engl.).
9. Gorchakov, G.I. & Bazhenov, Yu.M. (1986). *Stroitel'nye materialy*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
10. Malinina, L.A. (1977). *Teplovlazhnostnaya obrabotka tyazhelogo betona*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
11. Plotnikova, L.G., Pichugin, A.P. & Verigin, Yu.A. (2012). Vliyanie teplovoi obrabotki na poristost' betona. *Polzunovskii Vestnik*, (1/2), 93–97. (In Russ.). – URL: https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2012_01_2/pdf/093plotnikova.pdf.
12. Tarakanov, O.V. (2016). *Khimicheskie dobavki v rastvory i betony: monogr.* Penza: PGUAS. (In Russ.).
13. Yuhnevskii, P.I. (2013). *Vliyanie khimicheskoi prirody dobavok na svoistva betonov*. Minsk: Belorus. nats. tekhn. un-t. (In Russ.).
14. Batyanovskii, E.I., Gurinenko, N.S. & Korsun, A.N. (2022). Povyshenie morozostoikosti tsementnogo betona. *Mekhanika va tekhnologiya ilmii zhurnali [Scientific Journal of Mechanics and Technology]*, 2(7), 148–159. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Nesvetaev, G.V., Korchagin, I.V., Lopatina, Yu.Yu. & Khalezin, S.V. (2016). O morozostoikosti betonov s superplastifikatorami [About frost resistance of concrete with superplasticizers]. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*, 8(5). (In Russ., abstr. in Engl.). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN516.pdf>.

Поступила 30.09.2024

HEAVY-DUTY CONCRETE WITH FROST RESISTANCE F400 WITH COMPLEX CHEMICAL ADDITIVES

V. MARKOVTSOVA¹⁾, L. PARFENOVA²⁾, L. ZAKREVSKAYA³⁾

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

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

The article presents the results of studies of the influence of complex chemical additives on the physical and mechanical properties of concrete, taking into account the curing conditions. It has been experimentally confirmed that the complex additive: the hyperplasticizer Hidetal GP-9-Alpha, 0,7% of the cement mass, and the air-entraining additive Hidetal P8, 0,05% of the cement mass, allows to obtain concrete with a denser structure, promotes equally active strength gain of concrete in the early stages under air-dry curing conditions and under low-temperature heat and humidity treatment, at the age of 28 days under curing under heat and humidity treatment provides an increase in concrete strength by 15%. New experimental data are presented on the efficiency of the combined use of the hyperplasticizer Hidetal GP-9-Alpha and the air-entraining additive Hidetal P8 for obtaining concrete of class C32/40 with frost resistance grade F 400.

Keywords: heavy concrete, physical and mechanical properties, concrete composition, hyperplasticizer, air-entraining additive, complex modifier, frost resistance, accelerated method.

УДК 628.11(628.16)

DOI 10.52928/2070-1683-2024-38-3-46-49

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
В СКВАЖИНАХ ДЛЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ****Е.И. РАШКЕВИЧ***(Витебское областное коммунальное унитарное предприятие
водопроводно-канализационного хозяйства «Витебскоблводоканал»)*
selenapuko@gmail.com

В статье дана характеристика песчаных водоносных слоев, описано образование санитарных зон скважин, создание окислительной зоны скважин, произведены замеры уровней воды и их годовое изменение, выполнен расчет кольматации водоносного слоя.

Ключевые слова: подземные водоносные слои и горизонты, зоны санитарной охраны, окислительная зона, уровни воды в скважинах, расчет кольматации водоносного слоя.

Введение. В Республике Беларусь подземные воды используются как основной источник централизованного водоснабжения населения и являются надежными в гигиеническом и эпидемиологическом отношении по сравнению с поверхностными водоемами.

Применительно к системам водоснабжения малых населенных мест или отдельных предприятий, для забора подземных вод используются скважины в количестве 1–2 шт. и, как правило, глубиной 35–100 м.

Для слагающих водоносных слоев в таких скважинах характерны гидрогеологические четвертичные отложения, которые сплошным чехлом покрывают всю территорию республики [1] и находятся в верхней части зоны активного водообмена, что предопределяет формирование здесь пресных и ультрапресных подземных вод преимущественно гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава. При этом водовмещающими породами служат, прежде всего, водно-ледниковые отложения верхнечетвертичного поозерского образования, которые могут быть по вертикали в один или несколько водоносных слоев (горизонтов, пластов), локально водоносного или слабоводоносного характера.

Для систем водоснабжения водоносным слоем (горизонтом) считают зону под поверхностью земли, которая способна обеспечить добычу воды в масштабах, имеющих практическое (экономическое, стратегическое, промышленное и т.д.) значение.

Объект исследований – внутрипластовая обработка подземных вод в двух скважинах с водоносными песчаными слоями для малого населенного пункта, расположенного в Докшицком районе Витебской области. Производительность по воде системы водоснабжения выбранного объекта составляет до 50 м³/сут, часовые расходы: средний – 2, максимальный – 5 м³/ч.

Для подачи воды в малый населенный пункт используются две скважины № 1 и № 2 с дебитом каждая до 10 м³/ч, глубиной до 39 м и длиной проволочных фильтров 5 м. Расстояние между скважинами равно 12 м.

Скважины имеют несовершенный характер погружения и работают в переменном режиме. Общая высота рассматриваемого водоносного слоя до низа скважин составила 22,7 м. Подземный водоносный слой является однотипным для скважин, в верхней части ограничен глиной и представлен кварцево-полевошпатовыми мелко-среднезернистыми песками, которые содержат смесь чистого кварца (SiO₂) порядка 60% и полевых шпатов из породобразующих алюминиевых минералов в виде железа, кальция, натрия, калия, реже бария, в которых 18–20% Fe(AlSi₃O₈)₃, а остальное Ca(AlSi₃O₈)₂, NaAlSi₃O₈ и KAlSi₃O₈.

В данных скважинах подземная вода рассматривается как бескислородная и малосульфитная среда с величинами pH=7,2–8,0 и Eh=54–87 мВ. Состав ее не удовлетворяет требованиям СанПиН 10-124-99 РБ по содержанию общего железа до 3 мг/дм³ (двухвалентное железо – 2,51 мг/дм³). На пределе находится концентрация общей жесткости – 6,8 мг-экв/дм³. Дополнительно, концентрация марганца составляет в среднем 0,1–0,16 мг-экв/дм³, аммонийных солей – 0,2–0,5 мг/дм³.

Метод обезжелезивания воды непосредственно в водоносном пласте скважин *in-situ* в исполнении системы *Subterra* был реализован 2022–2024 гг. [2]. Сущность этого метода состоит в том, что в каждой отдельной скважине, непосредственно внутри водоносного пласта, происходят все стадии процесса обработки подземных вод: закачка обогащенной кислородом (воздуха) воды непосредственно в подземный водоносный пласт и, после окисления и образования гидрооксида железа, дальнейшая ее откачка в систему водоснабжения малого населенного пункта.

Экологические аспекты внутрипластовой обработки подземных вод.

Зоны санитарной охраны. Рассмотрим зоны санитарной охраны (ЗСО) источников централизованного водоснабжения, в данном случае двух скважин, основной целью которых является создание и обеспечение режима их функционирования, а также защита от загрязнений на территории, где они расположены.

Согласно данным^{1,2}, границы первого пояса ЗСО водозабора подземных вод должны устанавливаться от источника водозабора на расстоянии не менее: 30 м – при использовании защищенных подземных вод; 50 м –

¹ Постановление Министерства здравоохранения РБ от 30.12.2016 г. № 142 Об утверждении Санитарных норм и правил «Санитарные нормы и правила. Требования к организации зон санитарной охраны источников и централизованных систем питьевого водоснабжения». – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21731715p> (дата обращения: 03.09.2024).

² Постановление Министерства здравоохранения РБ от 16.12.2015 № 125 Об утверждении Санитарных норм и правил «Санитарно-эпидемиологические требования к охране подземных водных объектов, используемых в питьевом водоснабжении, от загрязнения». – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21530493p> (дата обращения: 10.09.2024).

при использовании недостаточно защищенных подземных вод. Если в группе подземных водозаборов расстояние между скважинами более 30 м и 50 м для защищенных и недостаточно защищенных подземных вод соответственно, первый пояс для скважин огораживается отдельно.

Для осуществления экспериментов по обработке подземной воды в водоносном пласте между скважинами проложены трубопроводы. Учитывая, что с других сторон скважин каких-либо встраиваемых сооружений и коммуникаций не производилось, то приняты вышеперечисленные положения. Тогда санитарной охраны будет не менее 30 м в стороны от каждой (для защищенных подземных вод), т.е. общие размеры экспериментальной площадки составили 42×30 м.

Согласно пояснительной записке проекта ЗСО скважин произведен расчет параметров второго и третьего поясов по величинам T_m (время, достаточное для утраты патогенными и болезнетворными микроорганизмами жизнеспособности и вирулентности) и T_x (время, в течение которого химический состав подземной воды будет оставаться стабильным на протяжении расчетного срока эксплуатации) с нанесением гидрогеологических профилей по характерным направлениям в пределах области питания водозабора.

Установлено также³, что скважины не расположены в местах, подвергаемых почвенной деформации или заболоченных и затопляемых паводковыми водами, а также ближе 30 м от магистралей с интенсивным движением транспортных средств.

Окислительная зона. В математической модели внутриводопластовой обработки воды одиночной скважины совершенного типа предполагается [2; 3], что предварительно созданная окислительная зона, образующаяся при закачке обогащенной кислородом воды в водоносный слой, имеет вид цилиндра с высотой, равной его мощности, в который закачивается эта обогащенная вода, и осью, совпадающей со скважиной. Существует два радиуса этой зоны – фронт поршневого вытеснения кислорода и его адсорбции к моменту окончания закачки воды в скважину. Фактически окислительная зона представляет собой в разрезе эллипсоид, где различаются радиусы с минимальным, средним и максимальным значением.

Однако рассматриваемые скважины имеют несовершенный характер с устройством фильтра. Тогда можно предположить, что в окислительной зоне минимальные указанные радиусы близки к 0 в точках сопряжения с верхним водоупорным слоем, в средней части скважины – равные, как в цилиндре, а в нижней фильтровой будут максимальными по длине фильтра.

Для определения этих радиусов воспользуемся формулами:

$$r_f^* = r_f(t_3) = \sqrt{r_0^2 + 2q_3 t_3 / n_0}; \quad (1)$$

$$R_0 = r^*(t_3) = \sqrt{r_0^2 + 2q_3 t_3 / (n_0 + \Gamma_{O_2})}; \quad (2)$$

$$\Gamma_{O_2} = \frac{n_0 \xi}{C_{O_2} + \xi}, \quad (3)$$

где $r_f^* = r_f(t_3)$ – расстояние от оси скважины до границы фронта поршневого вытеснения кислорода, м, в момент времени $t=t_3$;

R_0 – расстояние от оси скважины до границы фронта адсорбции кислорода к моменту окончания закачки, м;

r_0 – радиус скважины, 0,11 м;

q_3 – расход воды на закачку обогащенной кислородом воды в подземный пласт, 2,5 м³/ч;

t_3 – продолжительность закачки, 120 ч;

n_0 – пористость песчаного водоносного слоя, 0,32 в долях единицы;

Γ_0 – константа адсорбции Генри;

C_{O_2} – средняя концентрация кислорода в закачиваемой воде, 7 мгО₂/дм³;

ξ – вспомогательная величина.

Для рассматриваемого случая, используя расчетный математический продукт⁴ при $\Gamma_0=0,135$, получаем:

– минимальные радиусы R_0 и $r_f^* \rightarrow 0$;

– средние радиусы $R_0=3,03$ м, $r_f^*=3,6$ м;

– максимальные радиусы $R_0=6,45$ м, $r_f^*=7,69$ м.

Таким образом, можно считать, что окислительная зона не будет влиять на размеры площадки зоны первого пояса санитарной охраны.

Уровни воды в скважинах. Исследуемые скважины работали попеременно. Уровни воды в скважинах измерялись до эксперимента (апрель 2022 г.) и в его период. Для замера использовался уровнемер скважинный УС-50

³ См. сноску 2.

⁴ Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д. Свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права № 1781-КП «Модель применения метода внутриводопластовой обработки подземных вод в системах водоснабжения малых населенных пунктов».

с латунным датчиком 6–10 мм через штуцер в оголовке диаметром 25 мм. Статический и динамический уровни замерялись в ходе экспериментов в апреле каждого года через сутки при остановке или запуске насоса каждой скважины. Для замера выбиралось время не менее недели после окончания дождевой погоды. Расход воды устанавливался и замерялся водомером скважины. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты измерений уровня скважин

Год	Расход воды, м ³ /ч	Уровни воды в скважине, м		Примечание
		№ 1	№ 2	
Год ввода в эксплуатацию	–	1986	2020	Дебит каждой скважины 10 м ³ /ч
Апрель 2022	0	4,6	2,9	Продолжительность переключения каждого режима не менее 2-х часов
	2	5,5	4,0	
	4	8,4	5,1	
	6	11,9	6,4	
Апрель 2023	0	5,8	3,5	Скважина № 2 является основной для внутрипластовой обработки воды
	2	6,9	3,8	
	4	8,7	4,9	
	6	10,4	6,0	
Апрель 2024	0	5,3	3,0	
	2	7,0	3,3	
	4	9,2	4,2	
	6	11,3	5,7	

Полученные данные показывают, что за период 2022–2024 гг. происходило незначительное колебание уровня воды, особенно в скважине № 2, которая являлась основной заливной скважиной с последующей откачкой воды в водопроводную сеть малого населенного пункта.

Возможность кольтматации водоносной породы. Возможность кольтматации песчаного водоносного слоя с продуктами окислов железа вокруг фильтра скважины рассмотрим на примере расчета ее степени по методике В.В. Кулакова [4]. Условия и исходные данные, принимаемые в расчет:

- мощность водоносного горизонта – 22,7 м;
- среднее содержание железа в подземной воде – 2,5 мг/дм³;
- содержание железа в откачиваемой воде – 0 мг/дм³;
- среднее водопотребление малого населенного пункта – до 35 м³/сутки;
- средний радиус зоны осаждения нерастворимого железистого осадка вокруг скважины (в виде цилиндра) – 3,0 м;
- пористость – 0,32 (в т.ч. активная пористость – 0,16, неактивная пористость – 0,16);
- объемная плотность осадка (гетита) в порах пласта – 5 г/см³ (т/м³);
- расчетный срок эксплуатации водозабора (скважины) – 20000 суток (55 лет).

Принято, что отложение осадка соединений железа происходит в неактивных порах пласта.

1. Определяем количество железа, которое будет отложено в водоносном пласте и объем этого осадка:

$$35 \cdot 20000 \cdot 2,5 = 1,76 \text{ тонн};$$

$$1,76 : 5 = 0,35 \text{ м}^3.$$

2. Определяем объем пор (пустот) в водоносном горизонте вблизи скважины:

$$3,14 \cdot (3)^2 \cdot 22,7 \cdot 0,32 = 205 \text{ м}^3.$$

Из них активных (мобильных) пор – около 103 м³, а неактивных (немобильных) пор – около 102 м³. Тогда в течение расчетного срока эксплуатации будет заполнено всего 0,35% объема неактивных пор водоносного горизонта (0,35:102·100).

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Первый пояс санитарной охраны скважин определен исходя из условия, что с различных сторон их расположения каких-либо встраиваемых и посторонних сооружений, а также коммуникаций не имеется, равным 42×30 м. Кроме этого, скважины не расположены в местах, подвергаемых почвенной деформации или заболоченных и затапливаемых паводковыми водами, а также ближе 30 м от магистралей с интенсивным движением транспортных средств.

2. Установлено, что окислительная зона не будет влиять на размеры площадки зоны первого пояса санитарной охраны.

3. За период 2022–2024 гг. проведения экспериментов происходило при откачке воды из скважин на водопроводную сеть незначительное сезонное колебание уровней воды, т.е. кольтматации подземного водоносного слоя вокруг фильтров не происходило.

4. Произведен расчет возможной кольтматации водоносного слоя. Установлено, что в течение расчетного срока эксплуатации (55 лет) будет заполнено всего 0,35% объема неактивных пор водоносного слоя, что значительно менее максимальной величины загрязнений, принятых в наземных фильтрах в 4%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудельский А.В., Пашкевич В.И. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод Беларуси. – Минск: Бел. наука, 2014. – 261 с.
2. Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д. Применение метода внутрипластовой обработки подземных вод в системах водоснабжения малых населенных пунктов // Сб. науч. ст. по итогам работы Междунар. науч. форума «Наука и инновации – современные концепции» / г. Москва (11 апреля 2024 г.). – Т. 2. – М: Инфинити, 2024. – С. 215–223.
3. Рашкевич Е.И. Определение основных расчетных параметров процесса внутрипластовой обработки подземных вод и оценка их эффективности для малых населенных пунктов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2024. – № 2(37). – С. 64–71.
4. Кулаков В.В., Архипов Б.С., Козлов С.А. Методические рекомендации по опытно-технологическим исследованиям условий обезжелезивания и деманганации подземных вод в водоносном горизонте. – Хабаровск: Дальгеоцентр, 1999. – 61 с.

REFERENCES

1. Kudel'skii A.V. & Pashkevich, V.I. (2024). *Regional'naya gidrogeologiya i geokhimiya podzemnykh vod Belarusi*. Minsk: Bel. navuka. (In Russ).
2. Rashkevich, E.I. & Yushchenko, V.D. (2024). *Primenenie metoda vnutriplastovoi obrabotki podzemnykh vod v sistemakh vodosnabzheniya mal'kikh naselennykh punktov. Sb. nauch. st. po itogam raboty Mezhdunar. nauch. foruma «Nauka i innovatsii – sovremennye kontseptsii»*, 2, 215–223. (In Russ).
3. Rashkevich, E.I. (2024). *Opredelenie osnovnykh raschetnykh parametrov protsessa vnutriplastovoi obrabotki podzemnykh vod i otsenka ikh effektivnosti dlya mal'kikh naselennykh punktov* [Determination of the main design parameters of the process of in-situ groundwater treatment and assessment of their effectiveness for small settlements]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki* [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences], 2(37), 64–71. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Kulakov, V.V., Arkhipov, B.S. & Kozlov, S.A. (1999). *Metodicheskie rekomendatsii po opytно-tekhnologicheskim issledovaniyam uslovii obezhelezivaniya i demanganatsii podzemnykh vod v vodonosnom gorizonte*. Khabarovsk: Dal'geotsentr. (In Russ.).

Поступила 06.10.2024

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF IN-SITU GROUNDWATER TREATMENT IN WELLS FOR SMALL SETTLEMENTS

H. RASHKEVICH

*(Vitebsk Regional Municipal Unitary Enterprise
of water supply and sewage “Vitebskoblvodokanal”)*

The article describes the characteristics of sandy aquifers, the formation of sanitary zones of wells, the creation of an oxidizing zone of wells, measurements of water levels and their annual precipitation were made, the calculation of the colmatation of the aquifer was performed.

Keywords: groundwater aquifers and horizons, sanitary protection zones, oxidation zone, water levels in wells, calculation of aquifer colmatation.

УДК 347.787+904(476)

DOI 10.52928/2070-1683-2024-38-3-50-60

**ИТОГИ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОДПОЛЬЯ И СТЕН ДОМА XIX ВЕКА
(ЗДАНИЕ БЫВШЕГО «ГРАНД ОТЕЛЯ») ПО ПРОСПЕКТУ Ф. СКОРИНЫ, 5 В ГОРОДЕ ПОЛОЦКЕ**

А.А. СОЛОВЬЕВ

(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. Нами предполагалось наличие в его составе более ранних монументальных сооружений XVII–XVIII вв. и связанных с ними движимых артефактов. В ходе изучения существующего здания нами выявлены фрагменты конструкций двух построек второй половины XVIII в., а также собраны связанные с ними артефакты. Очертания данных зданий известны по планам Полоцка конца XVIII–XIX вв., но археологические исследования позволили выявить их конструктивные особенности, элементы планировки и убранства фасадов.

Ключевые слова: «Гранд Отель», глазуванная черепица, лекальный кирпич, постройка XVIII в., зондажи, печь, «Сталинка».

Введение. Изучаемое здание № 5 располагается на проспекте Ф. Скорины в г. Полоцке. Объект является историко-культурной ценностью «3» категории. Длительное время в здании находились учебные помещения Профессионально-технического училища № 2 (с мая 2004 г. – Полоцкого государственного профессионально-технического колледжа, с июля 2014 г. – Полоцкого государственного химико-технологического колледжа).

В 2019 г. объект был приобретен частной компанией ООО «Форт кей» с целью устройства в нем гостиничного комплекса под названием «Гранд Отель». В связи с необходимостью ремонта и переоборудования под новую функцию, весной этого же года в здании начались ремонтно-строительные работы. Необходимость сбора дополнительных сведений по реконструируемому историческому объекту, имеющему статус историко-культурной ценности, стала причиной для детального натурного изучения памятника. В том же 2019 г. были приобретены остальные примыкающие к зданию постройки, среди них дом № 3 по проспекту Ф. Скорины и объекты со стороны дворовой территории.

Здания, обращенные фасадами на проспект, получили названия «Отель» (дом № 5) и «Сталинка» (дом № 3). Корпус, расположенный в глубине квартала, получил название «Перемычка», поскольку соединял упомянутые выше здания со стоявшим строением на северной стороне квартала. Это здание, обращенное главным фасадом на ул. Советская (ранее Спасская), не имело каких-либо архитектурных украшений, но отличалось значительной толщиной стен и небольшими размерами окон. О его древности также говорило низкое расположение окон нижнего этажа, что свидетельствовало о значительном нарастании культурного слоя со стороны улицы. Это здание мы назвали «Крепость».

Данная работа посвящена натурным исследованиям стен подполья и первого этажа «Отеля», части будущего гостиничного комплекса, расположенной на углу проспекта Ф. Скорины и ул. Ленина (дом № 5) (рисунок 1).

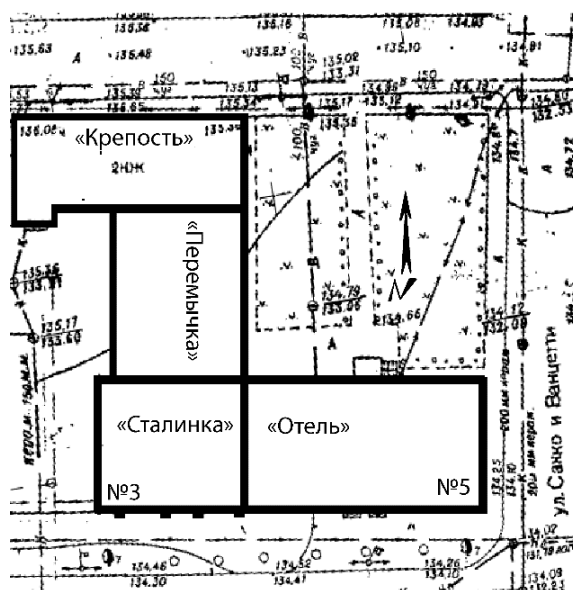
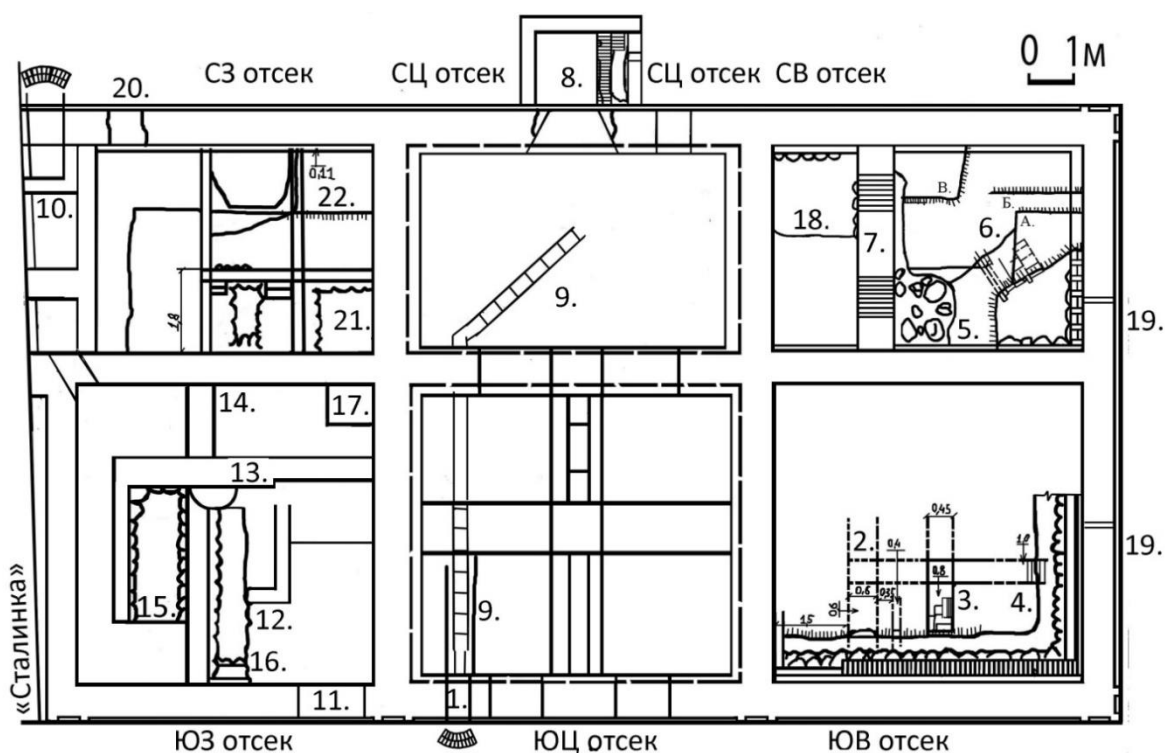


Рисунок 1. – Комплекс зданий бывшего «Гранд-Отеля» с маркировкой его строений

Изучаемая нами часть комплекса в начале XX в. располагалась на углу ул. Витебской и Вознесенской, имела два лицевых фасада: южный и восточный с элементами архитектуры классицизма и эклектики. Северный фасад (со стороны двора) сегодня практически лишен украшений, а несогласованное расположение окон его этажей свидетельствует о наличии перестроек.

Дата возведения здания «Отеля» неизвестна, однако по своим конструктивным и архитектурно-стилистическим особенностям его можно отнести к XIX – началу XX вв. (рисунок 2).

На планах Полоцка конца XVIII в. на месте исследуемого здания и прилегающей к нему территории зафиксирован ряд кирпичных(?) строений, фрагменты которых могли быть включены в структуру изучаемого нами объекта при возведении. На плане Полоцка 1786 г. на месте «Сталинки» стоят два близких в плане к квадрату кирпичных(?) дома, а на месте «Отеля» видны очертания ряда небольших вытянутых вглубь квартала деревянных(?) узкофронтонных домов, стоявших до регулярной перепланировки центральной части города. Самый ранний датированный план, где отмечены два кирпичных здания (отмечены более темным цветом), относится к 1793 г., а наиболее позднее из известных изображений этих построек относится к 1828 г. Размеры угловой постройки, судя по данным планам, составляли около половины площади, занятой «Отелем»¹ [1, с. 226: 3.3.22, с. 227: 3.3.23, с. 229: 3.3.26]. Таким образом, одним из направлений натурных исследований сохранившегося памятника стал поиск в его составе более ранних сооружений. Согласно данным «Маршрутов кварталов и дворовых участков по городу Полоцку. 1858–1859 гг.» (далее – «Маршруты»)², на месте «Отеля» никаких строений не фиксируется, большой каменный дом находился на месте так называемой «Сталинки».



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

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

¹ Маршруты кварталов и дворовых участков по городу Полоцку. 1858–1859 гг. Национальный исторический архив Республики Беларусь. Ф. 2523, оп. 1, ед. хр. 1., Соловьев, А.А. Усадебный комплекс «Домик Петра I в городе Полоцке»: История. Владельцы. Легенды. – Полоцк: Полоцк. кн. Изд-во, 2015. – 123 с.

² См. сноску 1.

При этом с учетом расположения объекта в самом сердце исторического центра города, существовала вероятность выявления в его структуре остатков еще более древних монументальных сооружений, подобных остаткам здания XVII в. на проспекте Ф. Скорины между домами 1–3 [2, с. 204].

О существовании монументальной застройки, предшествующей возведению существующих зданий, показали исследования второго этажа «Отеля». Теперь появилась возможность полного изучения найденной в его составе стены XVIII в.

Основная часть. Изучение кладок прорубленного проема в продольной стене существующего здания на стыке СЗ и ЮЗ отсеков, показало, что южная и западная сторона проема представлена грубой кладкой и забивкой из целого и битого кирпича на известковом растворе (см. рисунок 2). Внизу этого массива имелась заделанная в кладку цементом водопроводная труба второй половины XX в. Поиски замурованного проема для входа в соседнее здание начались с выборки данной забивки. Никаких его следов обнаружить не удалось. Выборка закладки и мусора позволила расчистить поверхность оштукатуренной стены, которая следов окрасок не имела, но визуально по составу была аналогична штукатуркам и кладочным растворам, применяемым при возведении ряда зданий в XVIII в. на территории Полоцка. Она оказалась нижней частью фрагмента восточного фасада, оставшегося от здания XVIII в., который был обнаружен ранее при снятии штукатурки на втором этаже. Это подтвердила и дальнейшая расчистка в юго-западном углу отсека ЮЗ, за трубой также расчищена оштукатуренная поверхность. В основной расчистке найдена кладка XIX в., закрывающая стену XVIII в., закрытая забивкой поверхность, примыкавшая к ней, имела швы с нарезкой. Характер расположения расчищенного участка стены XVIII в. говорит о ее продолжении в составе «Сталинка», которая расположена по проспекту Ф. Скорины, дом № 3. Эта часть будущего гостиничного комплекса была построена в конце 40-х годов XX в. из кирпичей от разрушенных зданий (см. рисунки 2, 3). Дальнейшая расчистка западной стены на первом этаже отсека СЗ показала, что она сохранилась от постройки конца XVIII в. Это объясняет ее неправильное расположение относительно изучаемого нами здания. Снятие штукатурки с изучаемой стены в коморе на первом этаже выявило срубленный межэтажный карниз и нижние части с выкладкой подоконников окон второго этажа. Они были на высоте от существующего пола коморы 3,0 м. До массивных наличников окон от срубленного карниза 0,6 м. Найденная фасадная штукатурка имеет следы зеленой (медный купорос?) и желтой покраски, на которой прослежен загиб на срубленный карниз толщиной в три ряда кирпича. В закладке окна на откосах сохранилась белая штукатурка (см. рисунки 3, 4).

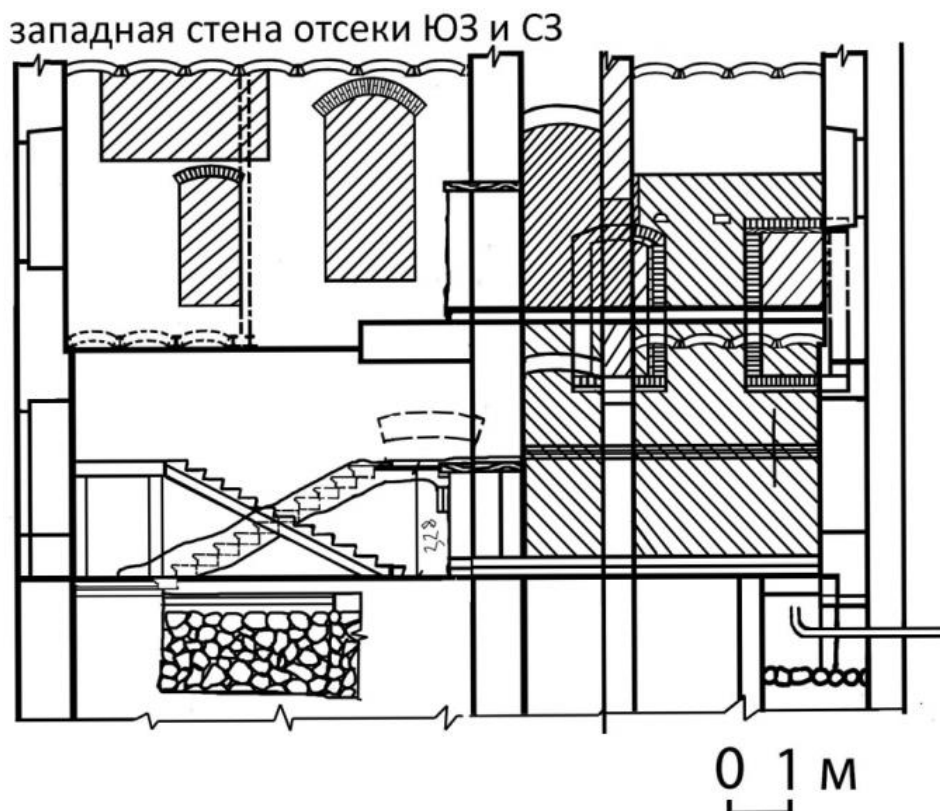


Рисунок 3. – Стена между «Отелем» и «Сталинкой» с фрагментом восточного фасада здания XVIII в., вид со стороны Юго-западного и Северо-западного отсеков с очертаниями его архитектуры – срубленных оконных обрамлений и межэтажного карниза. Косыми вправо отмечены кладки конца XIX–XX вв., косыми влево – кладки XVIII в.

Обследование выявленной на стыке «Отеля» со «Сталинкой» части стены XVIII в. показало, что она принадлежала двухэтажному зданию. Ее фасадная сторона, обращенная на восток, имела оконные проемы только на втором этаже, отделенном от нижнего карнизом, состоявшим из трех рядов кирпича. Окна имели кирпичные

лучковые и деревянные (поздний ремонт?) с поставленным на ребро кирпичом перемычки. Под их кладку были подведены обугленные доски, подобные тем, что использовались при возведении перемычек у нынешнего Домика Петра Первого в 1692 г. [3, с. 78, 79: рисунок 59]. Размеры окон (по фасаду) около 1,9×0,9–1,0 м, они имели массивное кирпичное обрамление толщиной в половину или 2/3 кирпича. Выявить следы венчающего карниза не удалось.



Рисунок 4. – Условные знаки для культурного слоя

Работы по усилению прилегающих к стене XVIII в. конструкций XIX – начала XX вв., связанных с существующим зданием, показали, что примыкающий к ним культурный слой перемешан при возведении существующего здания «Отеля» и его реконструкции начала XX в. Он содержит артефакты XVIII – середины XIX вв., среди них из артефактов, связанных с первоначальными элементами здания XVIII в., обнаружены обломки глазурованной черепицы, изразцов и посуды, концентрировавшихся непосредственно возле стены XVIII в. (см. рисунки 2, 5, 6).

Посуда, связанная с этим домом, представлена редкими обломками стеклянных, фаянсовых и керамических изделий. Среди стеклянной посуды преобладали обломки бутылок и стаканов. Данные изделия имеют широкие аналогии в археологических материалах Полоцка в числе выявляемых артефактов в непо потревоженных поздними перекопами культурных отложениях, относящихся к концу XVIII – началу XIX вв.

Ряд найденных фрагментов стеновых изразцов относился к середине XVIII в. и был с медальоном в венках. Среди находок имелись и безрамочные пластины и медальоны, характерные для изделий последней трети XVIII в. Они имеют прямые аналогии в материалах Полоцкого иезуитского коллегиума. Там из подобных изделий были сложены первоначальные печи в сохранившихся сегодня корпусах [4, с. 47, 49]. Эти артефакты могли быть выброшены из окон здания XVIII в. при его реконструкции в XIX в.

Отдельные обломки глазурованных черепиц встречены на значительном отдалении от найденной нами стены XVIII в. под полами существующего здания, условно называемого нами «Отелем», в булыжной кладке, заполнявшей арку конца XIX в., встроенную в контур фундаментов СВ отсека, в прилегающем к «Сталинке» корпусе «Перемычке» и в траншее под дренаж, проложенный перед домами № 1–9 по проспекту Ф. Скорины 2002 г. Найденные обломки изделий были покрыты толстым слоем коричневой или зеленой глазури. Судя по крепежным шипам в виде вытянутых прямоугольников, эти изделия имели терракотовые аналогии второй половины XVIII в. с рельефными клеймами. Подобные образцы были найдены нами среди археологических материалов при изучении сохранившихся сегодня корпусов Полоцкого иезуитского коллегиума [4, с. 25, с. 35: рисунок 10, с. 55].



1. и 4. – горлышки бутылок; 2. и 3. – венчики горшков; 5. – нижняя часть стакана; 6. – венчик жбана; 7. – край фаянсовой тарелки; 8.–13. – изразцы

Рисунок 5. – Фрагменты изразцов и посуды XVIII – начала XIX вв., собранные вокруг остатков здания XVIII в. в составе «Сталинки»

Первая основательная перестройка здания XVIII в. может быть связана с его приспособлением и объединением в конце 60-х – начале 70-х гг. XIX в. со строящимся «Отелем» [5, с 109, 110]. В частности, на фотоснимках «Гранд Отеля» здание, стоящее на месте будущей «Сталинки», имеет черты архитектуры, характерные именно для строений конца XIX – начала XX вв., окна имеют плоские перемычки, которые, судя по обрамлению проемов, могут иметь подкладки из досок с рядом кирпича, уложенного на кромку. Единственный первоначальный архитектурный элемент, который сохранился в перестроенном виде, – это междуэтажный карниз, который, судя по расположению окон первого этажа, был разбит и восстановлен вновь при устройстве их новых перемычек³, на восточном фасаде здания он был срублен.

Остатки еще одного кирпичного здания были обнаружены в юго-восточном отсеке «Отеля» при усилении фундаментов существующего объекта (см. рисунок 2: 2–4, рисунок 7). На глубине 0,9 м от чистового пола под ними прослежена верхняя часть стены, со зданием конструктивно не связанной. Толщина ее около 0,6 м, кладка выполнена на известковом растворе, из кирпича 28,0–29,0(до 31,0)×14,0–15,0×6,0–7,0 см, характерного для конца XVIII в. и не имевшего борозд.



Рисунок 6. – Фрагменты волнистой глазурованной черепицы XVIII в., собранные вокруг остатков здания XVIII в., находящихся в составе «Сталинки»

Восточнее данной стены на глубине 0,8–0,9 м от чистового пола существующего помещения прослежена прослойка глины. Под ней напротив центрального проема помещения существующего здания на глубине 1,1 м прослежена южная часть сложенной на глине выкладки из кирпича XVIII в. Его размеры 28,0–29,0(до 31,0)×14,0–15,0×6,0–7,0 см. Ширина конструкции около 0,45 м (в 1,5 длины кирпича XVIII в.). Врезка перед ее южным краем показала, что глубина конструкции более 0,2 м, что обеспечило ее прочность. На данной выкладке частично уцелели «in situ» поставленные профильные карнизные изразцы с «полочками», они располагались по краю южной и восточной стороны кладки и были покрыты зеленой «пятнистой» глазурью (рисунок 8: 5 и 10). Размеры наиболее сохранившегося из них 14,0×42,0×16,5 см, он имел румпу из пластин. Угол лицевой профильной пластины снятого с кладки изразца карниза имел следы сильного истирания, какое бывает только у углов активно эксплуатируемых ступеней лестниц. Это говорит о вторичном применении выявленного нами изразцового набора. Эти изделия имеют сходство с изразцовыми материалами Полоцкого иезуитского коллегиума, относящимися к концу XVIII в. [4, с. 58, 67].

³ Ліхадзедаў У.А. Беларусь, 1914–1918. Полацк – першая сталіца: фотаальбом. – Мінск: Белстан, 2022. – 288 с. – (У пошуках страчанага). (см. с. 159).

Расположение этих изделий позволяет определить приблизительный первоначальный уровень пола дома XVIII в., он мог располагаться на глубине 0,8–0,9 м от уровня чистового пола существующего здания. Среди найденных в слое над карнизными изразцами фрагментов стеновых пластин (?)×21,0×8,5 см и карнизов имели место как зелено глазурованные изделия, так и пятнистые. Завершение печи состояло также из профильных карнизных малоформатных зеленых изразцов. Найденный фрагмент половинной части углового изделия имел длину (?)×11,0×(?) см. Эти изделия характерны для последней трети XVIII в. и позволяли создать убранство печи в стиле классицизма (см. рисунок 8: 2–4, 8 и 9). Подобные целые артефакты найдены при исследованиях зданий Полоцкого коллегиума [4, с. 58, 67], поэтому на их основе можно реконструировать размеры и конструкцию фрагментарно сохранившихся элементов изразцового набора. В частности, высота пластин стеновых изразцов была в пределах 29,0–30,0 см, остается нерешенный вопрос с убранством угловых изделий. Находимые аналогии при изучении коллегиума имели на верхнем и нижнем изделии «конхи». Карнизы малого формата имели пластины 11,0–12,0×21,0–22,0 см и высокую румпу до 14,0–14,5 см от края пластины [4, с. 42: рисунок 21: 9]. На основе расширенной части фундамента и изразцового материала стало возможным сделать вариант реконструкции раскопанной части печи.

Ближе к фундаменту существующего здания начинался упомянутый завал земли с артефактами, оставшимися после сноса южной стены здания XVIII в. и прокладки траншей для забутовки булыжного фундамента существующего здания (см. рисунки 2, 7).

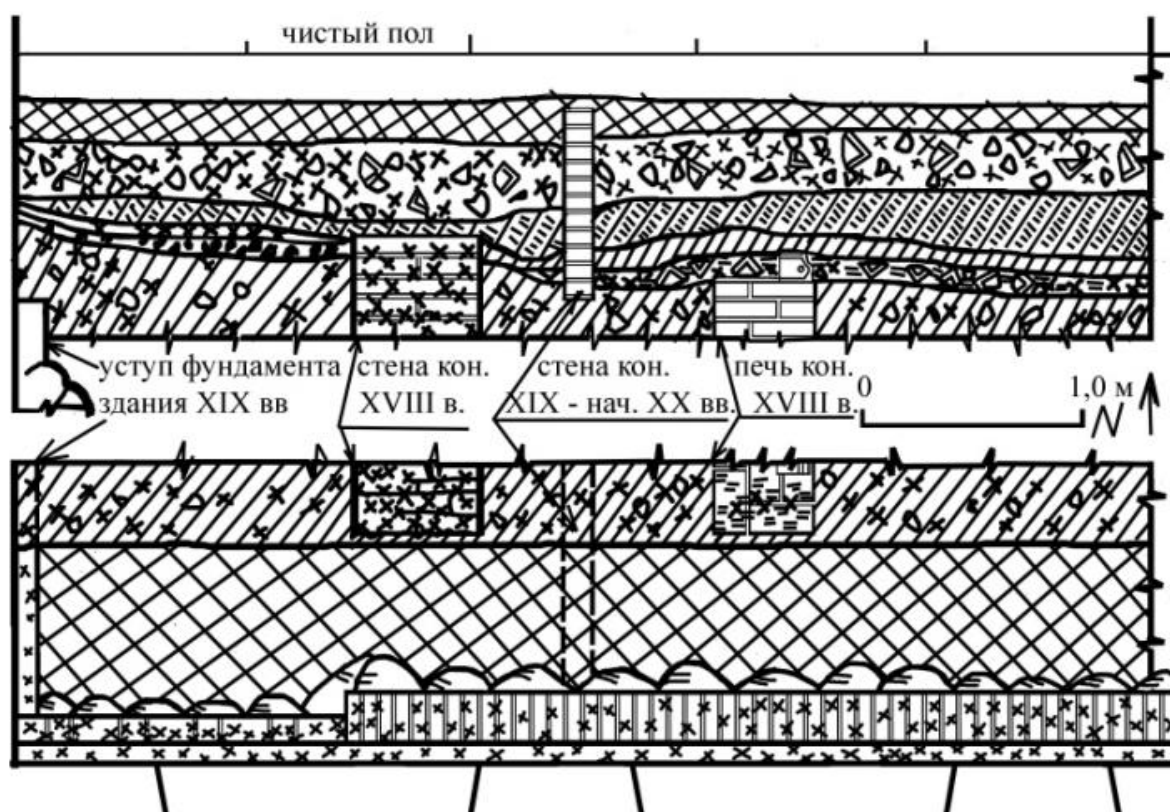


Рисунок 7. – План и стратиграфия остатков дома XVIII в. под полом юго-восточного отсека «Отеля», южный профиль

Проходка вдоль восточной стены (см. рисунки 2, 7) ЮВ отсека позволила вновь выйти на слой развала печи XVIII в. в виде обломков «пятнистых» изразцов. На глубине около 1,3 м от чистового пола найдена кирпичная кладка, характерная для арки шириной в кирпич (около 3,0 см), с ее южной стороны была кладка толщиной в половину кирпича (0,15 см). Таким образом, данную конструкцию можно интерпретировать в качестве основания кирпичной стены около 0,45 см толщиной с нишей, расположенной ниже уровня пола дома XVIII в. (см. рисунок 2: 4). Над аркой на глубине 1,15–1,2 м от чистового пола прослежен слой красной сырой и обожженной глины с обломками карнизных профильных и гладких стеновых изразцов с зеленой пятнистой глазурью. Там же найдены редкие обломки керамической и фаянсовой посуды XVIII в. Над ними прослежена прослойка серой земли с редкими углями толщиной около 10,0 см, в обеих прослойках, как и в завале над ними, имелось много обломков волнистой черепицы XVIII в. [4, с. 55] (см. рисунок 2: 5 и 7, рисунок 8: 11–14). Эти изделия были связаны с покрытием крыши обнаруженной нами постройки.

Данные кирпичные конструкции в виде арки, остатков двух стен и основания печи могут быть фрагментом планировки найденной нами восточной части дома и разделять ее на три-четыре помещения. Эти находки позволяют полагать, что большее парадное помещение располагалось на юго-восточной стороне обнаруженного нами дома и могло иметь размеры около 2,5×3,0±1,5 м, это удалось выяснить благодаря тому, что расположение «крас-

ных линий» улиц и кварталов с XVIII в., на которых стоит изучаемое нами сегодня здание («Отель»), сохранилось прежним. Юго-западное помещение представляло собой каморку или сени шириной 1,0×2,0–3,0 м, его использовали для обслуживания печей. Внешние восточная, южная и северная стены найденного нами дома XVIII в. были полностью уничтожены при возведении нынешнего, поскольку трассировки их фундаментов совпадали.

Найденная нами печь (остатки), судя по небольшой ширине фундамента (0,45×0,95(?) м), являлась отопительным щитком «стеновой», который играл роль дополнительной печи, будучи присоединенным к камину или плите в городских зданиях. Первые подобные печи в городских домах России и Речи Посполитой фиксируются с XVIII в., когда велись активные исследования в области фурыологии (механики огня) и разработки оптимальных отопительных систем для общественных и гражданских зданий. Основой для появления отопительных щитков стали так называемые «гданьские» печи – высокие изящные сооружения, в плане имеющие вид вытянутого прямоугольника с соотношением длины и ширины 1:2. Нередко в парадных помещениях дворцов и усадеб аристократии их подключали к каминам в одной комнате [6, с. 26; 7, с. 495: рисунок 320]. В нашем случае щиток разделял южную сторону дома на две неравные части. Меньшая из них располагалась с западной стороны от печи, она представляла собой небольшую каморку шириной около 1,0 м, большая восточная часть помещения была парадной. Именно в нее был обращен восточный, главный фасад отопительного щитка. Топка и дымоходный стояк могли примыкать к нему с северной стороны, их основой была кирпичная стена с аркой.



1.–5. и 10. – артефакты из развала печи (5 и 10 сняты с фундамента печи);
6. и 7. – стеновые изразцы из отсека СВ; 8. и 9. – фрагменты карнизов из отсека СВ;
11.–14. – фрагменты волнистой черепицы; 15. – фрагмент подсвечника; 16. – фрагмент стакана

Рисунок 8. – Фрагменты посуды, предметов быта, изразцов и волнистой черепицы XVIII – начала XIX вв. от здания XVIII в., собранные под полами отсека ЮВ и СВ «Отеля»

О конструкции стенок найденного сооружения можно предполагать два варианта. При первом варианте можно допустить, что западная стенка сооружения была кирпичной. Это могло быть связано с тем, что длина нижнего карнизного изразца составляла 42 см, а ширина печи около 45 см. Выявленный «in situ» целый карнизный изразец и фрагмент углового изделия исключали возможность установки второго углового элемента. Вынос профиля нижнего карниза на 6,0 см, как и уступ от него до западного края фундамента около 3,0 см, позволяли выполнить кладку из поставленного на ребро (в 1/4) кирпича (при его толщине около 7,0 см). При этом, если нижние ряды кирпичей упирались в карниз, то уже следующие перекрывали его и нависали над ним примерно на 1/4 длины кирпича, что примерно составляет 6,0–7,0 см. Также южный обрез кладки закрывал и стеновые изразцы. Кладка кирпичом имела и у торцевых стенок сооружения, она не только давала устойчивость конструкции, но будучи закрытой изразцами сводила к минимуму проникновение в помещения дыма и искр при возникновении трещин. Для организации движения газов печи ее внутреннее пространство могло иметь горизонтальную и вертикальную перегородки (для создания опускового хода) [6, с. 24], опорой которым могла быть кирпичная кладка с отверстиями (для скорей-

шего нагрева изразцов) на уровне нижних карнизов и первых двух рядов стеновых изразцов восточного фасада. Выше и ниже горизонтальной перегородки были отверстия от входа и выхода дыма. Конструкция была толщиной в 1/4 кирпича.

Таким образом, найденная нами печь сочетала в себе элементы устройства канальной и колпаковой печи и по своему устройству близка к «гданьским печам», где движение газов было организовано вокруг глубокой ниши или сквозного проема [8, с. 23: рисунок 2.1.7, с. 44: рисунок 2.3.1]. Вместе с этим данная конструкция в местах кладок медленно прогревалась при отоплении и основными теплоотдающими поверхностями были восточная и западная стенки щитка (рисунок 9: 2).

При втором варианте щиток мог быть полностью сложенным из изразцов, но нижние карнизы, высота которых составляла 14,0 см, на западной стене щитка заменили кладкой кирпича, поставленного на ребро, ширина которого 14,0–15,0 см; она служила опорой для стеновых изразцов. Благодаря этому применение кирпича в стенках печи исключалось, а горизонтальная и вертикальная перегородка (для создания опускающего хода), направлявшая газы, выполнялась из целой или разбитой вдоль черепицы, как это рекомендовалось первым фурнологом России Эдгардом Шретером [6, с. 24, 41]. Также для этой цели могли использовать пластины с изразцов с отбитыми румпами или плитки пола при достаточности их размеров (см. рисунок 9: 2).

Учитывая большие и глубокие румпы фрагментов выявленных стеновых и карнизных изделий, они не только плотно заполнялись глиной, но свободно вмещали в себя большие обломки крупноформатного кирпича, что позволяло использовать их в качестве полноценного строительного материала, способного выдерживать большие нагрузки от лежащих выше рядов. При этом ряд изразцов «стеночки» оставались полыми, играя роль «тепловых окон» [9, с. 52]. При топке печи они первыми начинали давать жар в помещение, а позднее подключались и остальные части стенок печи. Ширина швов между изразцами в печах XVII–XVIII вв. по данным изразцовых и печных материалов Полоцкого иезуитского коллегиума могла достигать 1,0–1,5 см [4, с. 53, 56, 61, 68, 72].

Судя по найденным в развале щитка изразцам, она не имела разделения на верхний и нижний ярусы карнизами, какие обычно бывают у печи – «грубки», поскольку ее топка и дымоходный стояк были пристроены в виде дополнительного объема с северной стороны. Карнизные изделия располагались только сверху и снизу, а стеновые представляли собой 6–7 рядов кладки.

Перекрытие щитка, возможно, было выполнено из нескольких слоев волнистых разбитых и целых черепиц или изразцов, длина подобных изделий 35–40 с лишним сантиметров, что позволяло надежно перекрыть полость сооружения шириной около 20 см (см. рисунок 8: 1 и 8, рисунок 9).

Наличие у лицевых поверхностей ряда глазурованных изразцов конца XVIII в. следов побелок говорит о косметических ремонтах, которым подвергалась печь в первой половине XIX в., на беленой поверхности стенок были хорошо видны трещины, что позволяло вовремя устранять опасность пожара.

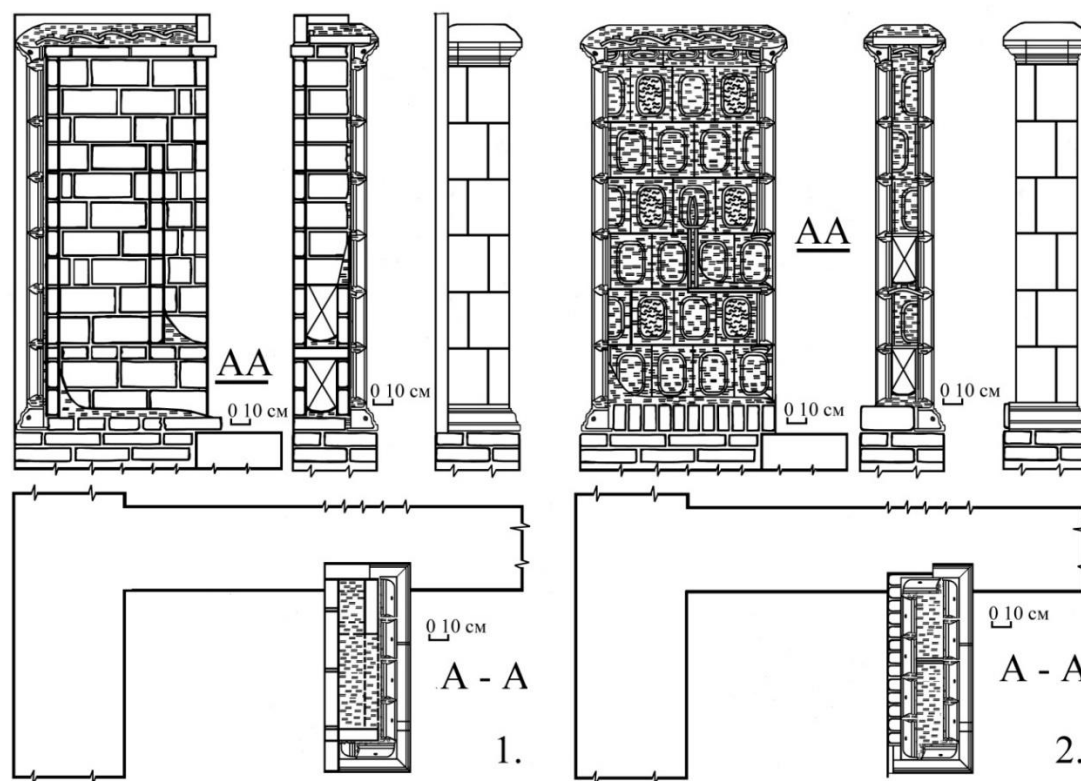


Рисунок 9. – Варианты реконструкции отопительного щитка с фрагментами внутренних стен углового здания XVIII в.

Оптимальная высота большинства изразцовых печей по наблюдениям польских исследователей составляла около 2,0–2,5 м, что обеспечивало доступ мастера для ремонта верхних частей и перекрытия печи. В ряде случаев высота и габариты печей определялись интерьерами здания, как это было в кельях монастырей католических орденов в целом и Полоцкого иезуитского коллегиума в частности, где их вписывали в контуры запечных ниш [4, с. 66, 67, 70–72]. Там же найдены остатки проемной печи, уже близкой по габаритам и конструктивному устройству к отопительному щитку с каналами или жаровыми колодцами. Найденное нами сооружение по своим габаритам и устройству еще более приближено к отопительным щиткам второй половины XIX – середины XX вв. и является остатками одного из старейших отопительных щитков Полоцка [4, с. 82, 83; 10, с. 156: рисунок 127, с. 157: рисунок 128, с. 158: рисунок 129].

Выявленная нами печь предназначалась для обогрева жилого дома с высотой потолков помещений около 3,0–3,5 м, что было наиболее характерно для мещанских домов среднего достатка. По наблюдениям польских исследователей высота печей составляла около 2/3 высоты помещения, в котором она ставилась. Обнаруженная нами «стенка» могла иметь высоту от 2,0 до 2,5 м, которая была наиболее распространенной в XVII–XVIII вв. [11, с. 90–92, 94, 96, 98].

Относительно конструкций дымовой трубы и топки можно лишь говорить о том, что основанием для них была расположенная с севера от отопительного щитка стена с аркой. Ее выявленная ширина около 0,45 м (1,5 кирпича) была достаточной для возведения дымового стояка коренной трубы (надсадную щиток бы просто не выдержал) с толщиной стенок 14,0–15,0 см (в половину кирпича). Первые подобные сооружения из кирпича и глины в виде белой стенки с 3–5 каналами появились в усадьбах и дворцах шляхты и городского нобилитета [12, с. 31, 119, 156, 304, 326, 334]. Топка найденной нами печи могла представлять собой как кухонный очаг, так и камин.

Обнаруженная нами кладка стены 0,45 м могла также быть основой как деревянной, так и кирпичной капитальной перегородки толщиной в кирпич между смежными помещениями, в которые были встроены дымоход и стояк коренной трубы. Следы подобных перегородок прослежены между помещениями с деревянными потолками на втором этаже в корпусе «В» Полоцкого иезуитского коллегиума. Его надстроили в последней четверти XVIII в. [4, с. 59].

Единичные подобные артефакты, связанные с остатками дома XVIII в., обнаружены и в СВ отсеке под слоями строительного мусора XIX–XX вв. (см. рисунок 8: 6–9, 11–16), отложившегося в подполье существующего здания. Большинство из них обнаружено в слое темно-серой земли на глубине 1,2–1,4 м, они представлены единичными обломками черепицы, изразцов, стеклянной и керамической посуды. Черепицы имеют массивные прямоугольные шипы двух видов – с соотношением длины и ширины как 1:2, так и 2:3, последние более характерны для изделий конца XVIII – начала XIX вв., что свойственно артефактам, обнаруженным в коллегиуме [4, с. 55]. Среди прочих изделий особый интерес представляют нижняя часть стакана и подсвечника. Стакан имел массивное донце с воздушным пузырем внутри. Подсвечник в виде бокала имеет много аналогий в материалах археологических исследований ряда монументальных сооружений Полоцка.

Далее под слоями заполнения подполья начиналась темно-серая сырая земля, культурный слой с артефактами XVII–XVIII вв., обломками посуды и изразцов, в котором были вырыты фундаментные рвы под существующее ныне здание. Следов северной стены дома XVIII в. при выборке заполнения подполья СВ отсека обнаружить не удалось.

Возможным временем значительного повреждения данной постройки могут быть события Отечественной войны 1812 г., после чего данный участок долго пустовал (до 1860-х годов), пока не началось возведение существующего ныне здания [5, с. 110].

Заключение. Проведенные исследования здания № 5 по проспекту Ф. Скорины подтвердили, что здания, очертания которых известны по планам Полоцка XVIII – начала XIX вв., были капитальными кирпичными сооружениями.

Одно из них, от которого сохранился фрагмент восточного фасада, было первоначально двухэтажным. Судя по сохранившимся фрагментам срубленных архитектурных элементов его убранства, этажи разделял межэтажный карниз, а высокие окна с лучковыми арками имели массивные обрамления, подобные тем, что есть у окон Полоцкого иезуитского коллегиума. Высота выявленных окон на уровне фасада около 2,2 м, ширина – около 1,1 м. Фигурный кирпич, найденный в «Сталинке», может быть связан с убранством главного фасада здания XVIII в., которое имело неоготические элементы.

В конце XVIII – начале XIX вв. изучаемое нами здание было частью кольцевого сооружения, где располагался «Почтовый двор», но значительным переделкам не подвергалось. С кровлей этого здания связана волнистая глазурированная черепица, находимая как в прилегающих к нему шурфах и траншеях, так и в строительном мусоре в «Сталинке». С его печами могут быть связаны безрамочные стеновые изразцы с медальонами и карнизы с фигурными профилями, стоявшими по все видимости, на парадном втором этаже.

Следующий дом располагался на углу нынешних ул. Ленина и проспекта Ф. Скорины. Его фундаменты внешних стен были почти полностью разобраны при закладке оснований и подвала существующего здания. Кирпичные конструкции XVIII в. сохранились только в подполье ЮВ отсека и были засыпаны в конце XIX – начале XX вв., при ремонтах существующего здания. Они представляют собой кладки внутренних несущих стен продольной толщиной в два кирпича (около 0,6 м), остатки поперечной стены представлены фрагментом кладки

арки, устройство которой может быть связано как с особенностями ее фундамента, так и с располагавшимся здесь погребом. Вблизи западной стены располагалась изразцовая печь, которая, судя по незначительной ширине кирпичного фундамента, являлась одновременно стенкой, разделявшей южную часть дома на две неравные части. Труба примыкала к печи с севера, там же с востока или запада могла примыкать топка, роль которой мог играть очаг или камин, но незначительная ширина траншеи не позволила выявить и изучить ее остатки. Пол в доме, скорее всего, был деревянным, поскольку никаких керамических плиток не обнаружено. Сам же дом, судя по незначительной толщине уцелевшего фрагмента западной стены, мог быть одноэтажным, но иметь деревянные перекрытия и кровлю из терракотовой волнистой черепицы.

Угловой дом XVIII в., от которого остались развал печи и фрагменты некоторых внутренних кирпичных стен, мог пострадать во время Отечественной войны 1812 г., но окончательно, видимо, был разрушен в 30–50-х годах XIX в.

Судя по остаткам конструкций двухэтажного дома, это было капитальное здание с массивными обрамлениями окон и междуэтажным карнизом на восточном фасаде. С его печами связаны находки безрамочных изразцов с медальонами. Его крыши имела покрытие глазурированной черепицы. Первая основательная перестройка двухэтажного дома XVIII в. связана с возведением «Отеля», начавшимся после составления в 1858–1859 годах «Маршрутов», и велась с целью объединения старого дома и новостройки. После пожара 1871 г. старое и новое здание поменяли владельцев и опять были разделены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чантурія Ю.В. Белорусское градостроительное искусство: средневековое наследие, ренессанс, барокко, классицизм в контексте европейского зодчества. – Минск: Бел. навука, 2017. – 503 с.
2. Дук Д.У. Полацк XVI–XVIII стагоддзяў: нарысы тапаграфіі, гісторыі матэрыяльнай культуры і арганізацыі жыццёвай прасторы насельніцтва беларускага горада: манагр. – Наваполацк: ПДУ, 2007. – 267 с.
3. Соловьев А.А. Усадебный комплекс «Домик Петра I в городе Полоцке»: История. Владельцы. Легенды. – Полоцк: Полоц. кн. изд-во, 2015. – 123 с.
4. Соловьев А.А. Полоцкий иезуитский коллегийум в ретроспективе (1581–1914): архитектурно-археологический очерк. – Полоцк: Полоц. кн. изд-во, 2012. – 97 с.
5. Соловьев А.А. Натурные исследования второго этажа здания бывшего «Гранд Отеля» по проспекту Ф Скорины, д. № 5 в г. Полоцке // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2022. – № 8. – С. 102–111.
6. Козлов А.А. История печного отопления в России. Серия Печи и камины. – М.: АНКО; СПб.: Эксклюзив Стиль, 2017. – Т. V. – 164 с.
7. Архітэктура Беларусі: нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславянскім і еўрапейскім кантэксце: у 4 т. / рэдкал.: А.І. Лакотка і інш. – Мінск: Бел. навука, 2006. – Т. 2: Другая палова XV – сяр. XVIII ст. – 624 с.
8. Szewczyk J. Piece wschodniej Europy jako fenomen architektoniczny i kulturowy na podstawie dawnej literatury anglojęzycznej. – Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2012. – 181 s.
9. Здановіч Н.І. Кафлярства ў Беларусі (на матэрыяле калекцыі полацкай кафлі): метадычны дапаможнік. – Мінск: БДПУ, 2005. – 99 с.
10. Лакотка А.И. Белорусское народное зодчество: середина XIX – XX вв. – Минск: Навука і Тэхніка, 1991. – 287 с.
11. Łaskiewicz A. Kafle i piece kaflowe z dworu na kopcu w krajowie pod mosiną, wojpознаńskie. – Poznań: Stowarzyszenie Naukowe Archeologów Polskich, 1997. – 230 s.
12. Якимовіч Ю.А. Зодчество Белоруссии XVI – середины XVII в.: справочное пособие. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 366 с.

REFERENCES

1. Chanturiya, Yu.V. (2017). *Belorusskoe gradostroitel'noe iskusstvo: srednevekovoe nasledie, renessans, barokko, klassitsizm v kontekste evropeiskogo zodchestva*. Minsk: Belaruskaya navuka. (In Russ.).
2. Duk, D.U. (2007). *Polatsk XVI–XVIII stagoddzyau: narysy tapagrafii, gistoryi materyyal'nai kul'tury i arganizatsyi zhytstsevai prastory naseľnitstva belaruskaga gorada: managr*. Navapolatsk: PDU. (In Belarus.).
3. Solov'ev, A.A. (2015). *Usadebnyi kompleks "Domik Petra I v gorode Polotske"*: Istoryia. Vladel'tsy. Legendy. Polotsk: Polots. kn. izd-vo. (In Russ.).
4. Solov'ev, A.A. (2012). *Polotskii iezuitskii kollegium v retrospektive (1581–1914): arkhitekturno-arkheologicheskii ocherk*. Polotsk: Polots. kn. izd-vo. (In Russ.).
5. Salau, A.A. (2022). *Naturnye issledovaniya vtorogo etazha zdaniya byvshego «Grand Otelya» po prospektu F. Skoriny, d. № 5 v g. Polotske* [Field studies of the second floor of the former Grand Hotel building, 5 F. Skorina avenue, Polotsk]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil Engineering. Applied Sciences]*, (8), 102–111. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Kozlov, A.A. (2017). *Istoriya pechnogo otopleniya v Rossii. Seriya Pechi i kaminy*: T. V. Moscow: ANKO; Saint-Petersburg: Eksklyuziv Stil'.
7. Lakotka, A.I. (Eds.), Gabrus', T.V. (Eds.), Kulagin, A.M. (Eds.), Pyatrosava, A.Yu. (Eds.), Sardarau, A.S. (Eds.) & Chanturiya, Yu.U. (Eds.) (2006). *Arkhitektura Belarusi: narysy evalyutsyi va uskhodneslavyanskim i eurapeiskim kantekste*: u 4 t. T. 2: Drugaya palova XV – syar. XVIII st. Minsk: Bel. navuka. (In Belarus.).
8. Szewczyk, J. (2012). *Piece wschodniej Europy jako fenomen architektoniczny i kulturowy na podstawie dawnej literatury anglojęzycznej*. Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej. (In Polish).

9. Zdanovich N.I. (2005). *Kaflyarstva u Belarusi (na materyyale kalektsyi polatskai kafli): metadychny dapamozhnik*. Minsk: BDPU. (In Belarus.).
10. Lakotko, A.I. (1991). *Belorusskoe narodnoe zodchestvo: seredina XIX – XX vv.* Minsk: Navuka i Tekhnika. (In Russ.).
11. Łaskiewicz, A. (1997). *Kafle i piece kaflowe z dworu na kopcu w krajowie pod mosiną, wojpознаńskie*. Poznań: Stowarzyszenie Naukowe Archeologów Polskich. (In Polish).
12. Yakimovich Yu.A. (1991). *Zodchestvo Belorussii XVI – serediny XVII v.: spravochnoe posobie*. Minsk: Navuka i tekhnika, (In Russ.).

Поступила 17.10.2024

**RESULTS OF FIELD STUDIES OF THE UNDERGROUND AND WALLS
OF A XIX-CENTURY HOUSE (THE BUILDING OF THE FORMER GRAND HOTEL)
AT 5 F. SKORINA AVENUE IN THE CITY OF POLOTSK**

A. SOLOVIEV

(Polotsk National Historical and Cultural Museum-Reserve)

The article presents the results of the field studies of one of the buildings of the complex of the former «Grand Hotel» hotel, carried out during the construction work. This object is located in the center of the historical part of Polotsk. We assumed the presence of the earlier monumental structures of the XVII–XVIII centuries and related movable artifacts as the part of the building. During the study of the existing building, we identified two buildings of the second half of the XVIII century, and collected artifacts related to them. Their outlines are known from the plans of Polotsk of the end of the XVIII–XIX centuries, but archaeological research helped us to reveal their structural features.

Keywords: «Grand Hotel», tile glazed, brick profil, XVIII-century building, probing, stov, «Stalinka».

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.482.3:519.6

DOI 10.52928/2070-1683-2024-38-3-61-67

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

В.Н. КАШУРА, канд. техн. наук, доц. И.Е. РАК
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
inggeod@bntu.by

В статье рассмотрены математические методы для анализа смещений деформационных марок, установленных в действующем тоннеле метрополитена, находящемся в зоне строительства пересадочной станции, в целях прогнозирования изменений значений абсолютной осадки и сдвига деформационных марок. Выполнен расчет значений вертикальных смещений деформационных марок (абсолютная осадка) и общих изменений положения марок в плане (сдвиг) с начала деформационных наблюдений. С помощью линейного регрессионного анализа на коротком промежутке времени найдены положительные линейные зависимости между значениями абсолютной осадки, сдвигом деформационных марок и пройденным временем. Рассмотрена возможность применения искусственного интеллекта для решения этой задачи.

Ключевые слова: деформации инженерных сооружений, прогнозирование деформаций, анализ деформации, линейная регрессия, искусственный интеллект.

Введение. Во всем разнообразии деформационных измерений исследование осадок сооружений занимает наиболее значительное место: во-первых, осадка сооружения является причиной многих видов деформаций, особенно неравномерных, во-вторых, по величинам осадок можно вычислить некоторые другие виды деформаций, например, прогиб, крен.

Осадку каждой отдельной точки сооружения может быть определена как разность отметок этой точки, полученных в двух различных (по времени) циклах наблюдений и в одной системе счета высот¹. Вертикальные смещения сооружений зависят, прежде всего, от физико-механических свойств грунтов, различных техногенных факторов, а также таких случайных факторов, как влажность, уровень грунтовых вод, температура грунта и другие. Сопутствуя измерениям и действуя совместно, эти факторы нарушают закономерность развития смещений во времени. Поэтому так важен качественный прогноз, который бы позволил глубже понять механизмы и причины, вызвавшие деформации, что в конечном счете способствовало бы улучшению проектных решений, технологий строительства и эксплуатации объекта. Надежность прогноза зависит прежде всего от качества полевых измерений [1].

Разработка и внедрение математической модели и установление зависимости между случайными факторами и деформацией методами математической статистики является одним из важных направлений исследования деформаций [2]. Сегодня методы цифровой обработки результатов наблюдений являются более надежными и универсальными в сравнении с аналоговыми методами [3], а использование искусственного интеллекта (ИИ) в прогнозировании деформаций предоставляет мощный инструмент для повышения точности и эффективности прогнозов, так как ИИ способен анализировать большие объемы информации, выявлять скрытые закономерности и делать точные предсказания.

Вопросы статистической обработки результатов наблюдений за деформациями и прогнозирование рассмотрены достаточно широко в специальной литературе [4–9]. Авторы статьи ставили перед собой цель рассмотреть в ней те вопросы, которые не освещались ранее или требуют современных подходов.

Основная часть. Особое значение при анализе результатов наблюдений за деформациями инженерных сооружений имеет выявление количественной зависимости между деформациями и возможными причинами их возникновения, выражение этой зависимости в виде математических уравнений и использование их для прогноза деформаций во времени. Для решения этих задач используется корреляционный анализ, в котором вычисляются количественные характеристики степени корреляционной связи.

Метод основан на вычислении коэффициентов парной корреляции или корреляционного соотношения между каждыми парами параметров по результатам экстремальных опытов. При наличии высокой корреляционной связи один из них выражается через другой корреляционным уравнением. Таким образом, происходит исключение параметра из пары при получении информации о нем по корреляционному уравнению.

Коэффициент парной корреляции:

$$r_{1,2} = \frac{\sum_1^n \Delta y_1 \Delta y_2}{\sqrt{\sum_1^n \Delta y_1^2 \cdot \sum_1^n \Delta y_2^2}}, \quad (1)$$

где Δy_1 и Δy_2 – разность между текущим и средним значениями параметров;
 n – количество измерений.

¹ СН 1.02.01-2019. Инженерные изыскания для строительства. – Минск: РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», 2020. – 120 с.

где $dx_{(0)j}$ и $dy_{(0)j}$ – смещения в плане каждой марки с момента начала наблюдений рассчитывается по формулам:

$$dx_{(0)j} = X_j - X_0; \quad (7)$$

$$dy_{(0)j} = Y_j - Y_0, \quad (8)$$

где X_0, Y_0 – координаты марки в нулевом цикле;

X_j, Y_j – координаты марки в текущем цикле.

Все деформационные характеристики вычислялись с использованием уравненных координат и высот контрольных точек.

Исследования проводились в 3 этапа.

На первом этапе для исследования был взят начальный 10-месячный период наблюдений с 07.04.21 года по 05.01.22 года (10 циклов) и проведен анализ зависимостей между сдвигом и пройденным временем для всех деформационных марок. Искался только тип зависимости, указывающий на устойчивый рост величины сдвига с течением времени, а именно – положительная линейная зависимость.

Для выполнения расчетов по формулам (1), (3), (4) была создана таблица в Microsoft Excel.

На рисунке 2 представлена таблица анализа связи между сдвигом марки 1-5 и временем за 10 циклов деформационных измерений.

N117 : X ✓ fx =I129/КОРЕНЬ(G129*H129)													
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
117	y1 - число пройденных дней, y2 - сдвиг марки 1-5								коэффициент парной корреляции				0,664387
118		y1	$y_2 = a_0 + b_1 y_1$	Δy_1	Δy_2	Δy_1^2	Δy_2^2	$\Delta y_1 \Delta y_2$	табл значение (n=10 p=0,95)				0,632
119	1	70	1,0000	-143,40	-0,951	20563,56	0,905	136,40	есть линейная зависимость?				ИСТИНА
120	2	97	1,0000	-116,40	-0,951	13548,96	0,905	110,72					
121	3	130	1,4142	-83,40	-0,537	6955,56	0,288	44,78					
122	4	186	1,0000	-27,40	-0,951	750,76	0,905	26,06	уравнение $y_2 = a_0 + b_1 y_1$				
123	5	211	2,2361	-2,40	0,285	5,76	0,081	-0,68	b1 =				0,0072
124	6	234	1,4142	20,60	-0,537	424,36	0,288	-11,06	a0 =				0,42
125	7	270	3,6056	56,60	1,654	3203,56	2,737	93,64	$y_2 = 0,42 + 0,0072 y_1$				
126	8	283	3,6056	69,60	1,654	4844,16	2,737	115,15					
127	9	310	2,2361	96,60	0,285	9331,56	0,081	27,52					
128	10	343	2,0000	129,60	0,049	16796,16	0,002	6,33					
129	средние	213,40	1,9512			Σ	76424,40	8,93	548,85				

Рисунок 2. – Анализ связи между сдвигом деформационной марки 1-5 и пройденным временем за 10 циклов измерений

Табличное критическое значение для уровня доверия $\alpha=0,05$ и 10 циклов наблюдений равно 0,632. В данном случае, для марки 1-5, рассчитанное значение коэффициента корреляции больше критического, значит присутствует положительная линейная зависимость между сдвигом деформационной марки 1-5 и временем.

Для марки 1-5 были рассчитаны коэффициенты уравнения линейной зависимости по формулам (3), (4). Уравнение линейной зависимости для марки 1-5 приняло следующий вид:

$$y_2 = 0,42 + 0,0072 y_1, \quad (9)$$

где y_1 – число пройденных дней;

y_2 – сдвиг деформационной марки 1-5.

Доступность данных позволила провести анализ 41 деформационной марки. Из них зависимость была выявлена в 7 случаях, а именно для марок 1-5, 2-5, 3-6, 4-2, 4-4, 6-5, 7-6.

На **втором этапе** проведен такой же анализ для значений абсолютной осадки с использованием измерений того же периода. Из рассмотренной 41 деформационной марки положительная линейная зависимость от времени не была выявлена ни для одной.

На **третьем этапе** был выполнен более глубокий анализ зависимости между сдвигом и пройденным временем. Были выбраны 7 деформационных марок, а именно марки 1-5, 2-5, 3-6, 4-2, 4-4, 6-5, 7-6, в которых была обнаружена линейная зависимость на первом этапе, а также деформационная марка 7-7. Для деформационной марки 7-7 зависимость на первом этапе не была обнаружена, однако она была выбрана для анализа из-за того, что имела максимальные значения смещения в плане среди всех деформационных марок в двух последних измерениях.

На этом этапе были использованы данные со всех доступных 21 цикла измерений от апреля 2021 г. до февраля 2023 г. В итоге для каждой деформационной марки имелось 21 значение (для марки 7-7 имелось 20 значений из-за одного не проведенного измерения).

На данном этапе также искалась положительная линейная зависимость между сдвигом и пройденным временем. Анализ производился аналогично предыдущим шагам с соответствующе выбранным табличным критическим значением.

В итоге из восьми анализируемых деформационных марок положительная линейная зависимость между сдвигом и пройденным временем была подтверждена в 4 случаях, а именно для марок 1-5, 6-5, 7-6 и деформационной марки 7-7, для которой изначально линейная зависимость не была найдена.

Для каждой из восьми анализируемых на третьем этапе деформационных марок были построены графики, показывающие зависимости между сдвигом и пройденным временем. На рисунке 3 представлен график, показывающий зависимость между сдвигом деформационной марки 2-6 и временем.

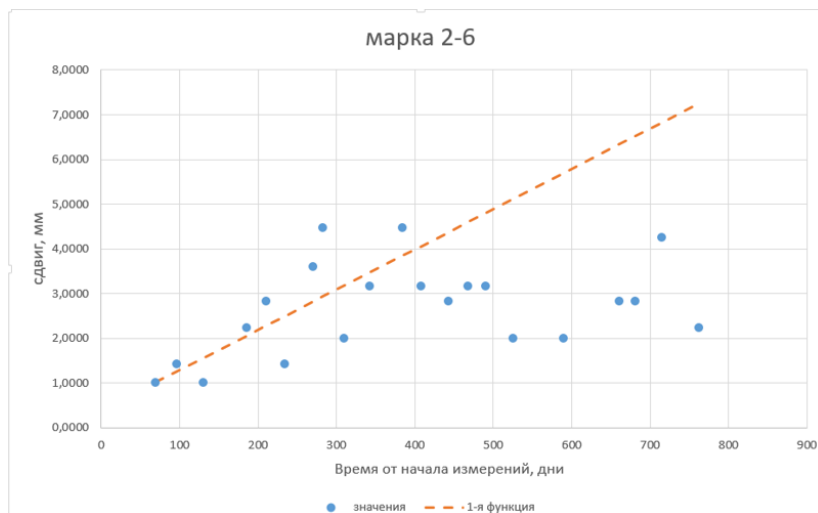


Рисунок 3. – График зависимости между сдвигом деформационной марки 2-6 и пройденным временем

На графике точки обозначают сдвиг марки 2-6, штриховая линия обозначает уравнение зависимости, полученное на первом этапе в результате анализа 10 циклов измерений. Значения этой зависимости достаточно точно совпадают со значениями в первой половине измерений и не совпадают со значениями во второй половине измерений, а именно, значения сдвига деформационных марок во второй половине измерений очевидно ниже, чем величины, соответствующие зависимости из первого этапа. Эта зависимость предсказывает рост величины сдвига деформационной марки, в то время как реальные его значения остаются примерно такими же.

Значит, для деформационных марок 2-6, 3-6, 4-2, 4-4 не существует положительной связи сдвига со временем, а получение связей на первом этапе анализа было случайным.

Из этого можно сделать вывод о том, что десяти циклов деформационных измерений может быть недостаточно для того, чтобы точно определить наличие положительной линейной связи между сдвигом деформационной марки и пройденным временем. Таким образом, можно сказать, что зависимость, полученная на основании небольшого числа циклов деформационных измерений, склонна предсказывать более высокие значения сдвига по сравнению с реальными значениями, получаемыми в результате дальнейших измерений, а иногда и вообще выявлять зависимость там, где она не присутствует.

Графики для деформационных марок 1-5 (рисунок 4), 6-5 имеют похожий вид.

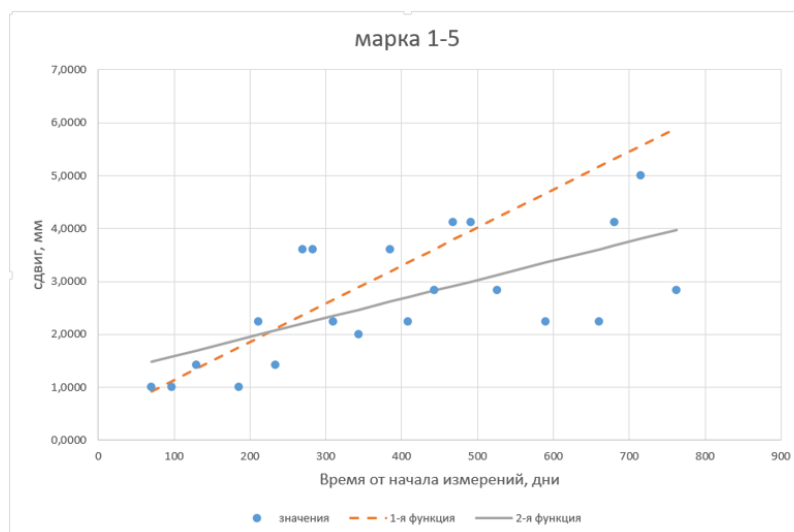


Рисунок 4. – График зависимости между сдвигом деформационной марки 1-5 и пройденным временем

Для этих деформационных марок 1-5 и 6-5 зависимость была найдена на обоих этапах анализа. Однако очевидно, что значения сдвига деформационных марок после 10 цикла измерений значительно ниже, чем величины, соответствующие зависимости из первого этапа.

С другой стороны, по графику для деформационной марки 7-6 (рисунок 5) было определено, что в этом случае полученные зависимости почти совпадают, и предсказания первой зависимости о сдвигах деформационных марок во второй половине цикла измерений оказываются даже немного заниженными.

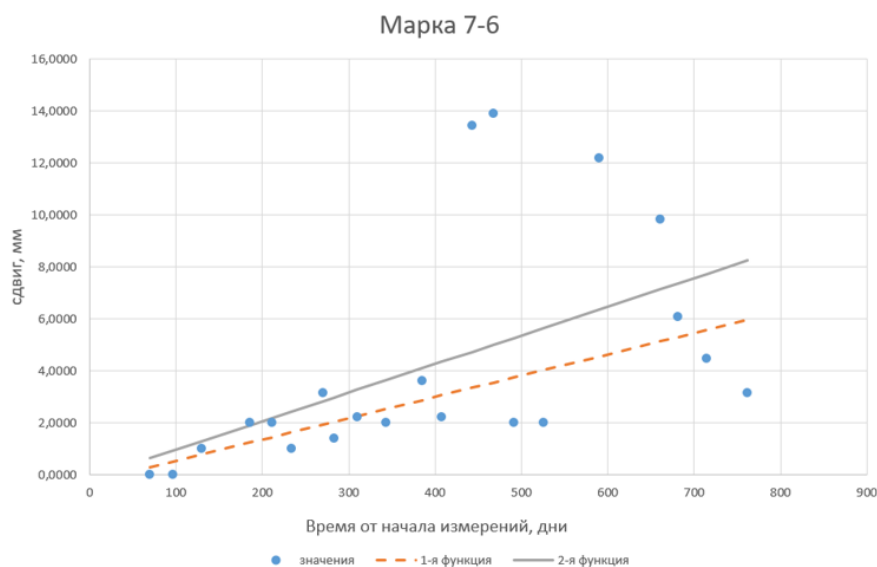


Рисунок 5. – График зависимости между сдвигом деформационной марки 7-6 и пройденным временем

Для деформационной марки 7-6, несмотря на большую вариацию значений сдвига, можно говорить об устойчивом тренде на его рост с течением времени.

Таким образом, можно сказать, что зависимость, полученная на основании небольшого числа циклов деформационных измерений, склонна предсказывать более высокие значения сдвига по сравнению с реальными значениями, получаемыми в результате дальнейших измерений, а иногда и вообще выявлять зависимость там, где она не присутствует. Однако иногда предсказания могут оказаться довольно точными.

Для деформационной марки 7-7 на первом этапе зависимость не была найдена, однако после анализа 20 циклов измерений был найден устойчивый тренд роста показателя сдвига с пройденным временем, а также значения, даже превышающие тренд, на последних нескольких измерениях (рисунок 6).

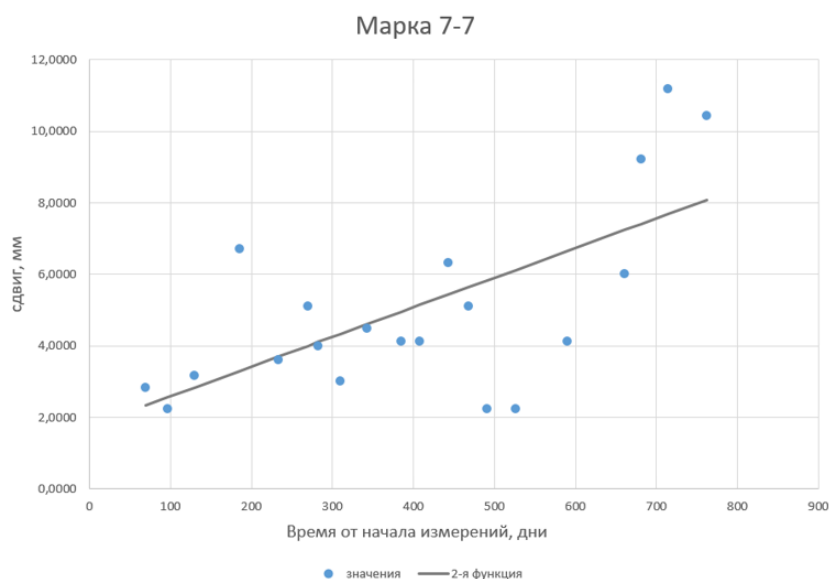


Рисунок 6. – График зависимости между сдвигом деформационной марки 7-7 и пройденным временем

Таким образом, отсутствие зависимости на непродолжительном цикле деформационных измерений не исключает возможность ее наличия на более продолжительном цикле измерений, и при получении неожиданно больших абсолютных значений сдвига с начала наблюдений деформационных марок необходимо проверять наличие зависимости сдвига от пройденного времени, даже если ранее она не была найдена.

Используя похожий принцип разбиения данных [10], для анализа собранных данных можно применить и более сложные статистические методы прогноза временных рядов, а также методы искусственного интеллекта. Для этого данные необходимо разбить по времени на три части и использовать полученные части следующим образом: первую часть – для обучения статистических моделей и (или) моделей искусственного интеллекта с всевозможными параметрами, вторую часть – для проверки прогноза моделей и выбора тех моделей, которые лучше всего предсказывают будущие значения, третью часть – для дополнительной проверки выбранных наилучших моделей. При этом, каждая часть данных должна представлять значимый набор измерений. В связи с этим, для такого анализа общее число измерений должно составлять не меньше пятидесяти.

Заключение. На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Была найдена четкая положительная линейная зависимость между сдвигом с начала наблюдений и пройденным временем для четырех деформационных марок. Соответственно, для этих деформационных марок можно построить оценки, которые укажут, через какое время можно ожидать, что значения показателя сдвига превысят недопустимый уровень, и планировать возможность дальнейшего проведения строительных работ и принятия мер по уменьшению воздействия объекта строительства, исходя из этой оценки. При проведении будущих измерений на деформационных марках 1-5, 6-5, 7-6 и 7-7 необходимо уделять особое внимание, т.к. можно утверждать, что с высокой вероятностью значение сдвига продолжит увеличиваться.

2. Выявлено, что отсутствие зависимостей и видимых увеличений для абсолютной осадки указывает на стабильность этого параметра для всех деформационных марок.

3. Проведенный анализ показал, что наличие сдвига на одном наборе измерений не гарантирует сохранение зависимости на более широком наборе измерений. Для обнаружения устойчивых зависимостей в подобных случаях необходимо производить много измерений в течение долгого промежутка времени. Также было выявлено, что предварительный анализ зависимостей на более коротком промежутке может быть использован для исключения из измерений деформационных марок, на которых зависимости явно не наблюдаются, однако появление высоких значений параметра может говорить о наличии зависимости, даже если она не была обнаружена раньше.

4. Установлено, что метод парной корреляции может использоваться для анализа деформации инженерных сооружений с целью прогнозирования будущих значений. Для получения точных оценок необходимо производить измерения регулярно на протяжении долгого времени и получать не менее двадцати измерений. Однако меньшее число измерений может быть использовано для предварительной оценки зависимости и обнаружения деформационных марок, на которых существование положительной зависимости от времени более вероятно.

5. Выявленные положительные линейные зависимости свидетельствуют о том, что в некоторых частях тоннеля наблюдается стабильно возрастающая деформация, которая может быть вызвана новым строительством рядом с тоннелем. В этой зоне необходимо проводить дальнейшие измерения для контроля выявленных сдвигов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геодезические методы исследования деформаций сооружений / Зайцев А.К., Марфенко С.В., Михелев Д.Ш. и др. – М.: Недра, 1991. – 272 с.
2. Гуляев Ю.П. Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений: моногр. – Новосибирск: СГГА, 2008. – 256 с.
3. Павлов А.И. Цифровое моделирование при мониторинге деформаций // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – № 4(16). – С. 98–106.
4. Измерение вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / Ганышин В.Н., Стороженко А.Ф., Ильин А.Г. и др. – М.: Недра, 1981. – 215 с.
5. Гридчин А.Н. Выбор оптимального метода подбора уравнений осадок при их прогнозировании // Методы инженерной геодезии в ирригационном и гидротехническом строительстве. – Ростов-на-Дону, 1973. – С. 11–16.
6. Михелев Д.Ш., Рунов И.В., Голубцов А.И. Геодезические измерения при изучении деформации крупных инженерных сооружений. – М.: Недра, 1977. – 152 с.
7. Нестеренок М.С. О прогнозировании затухающей осадки // Геодезия и аэрофотосъемка. – 1972. – № 4. – С. 77–81.
8. Новак В.Е., Горелов В.А., Ямбаев Х.К. Вероятностно-статистический анализ результатов створных измерений, производимых оптическим методом // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Проектирование. – 1975. – № 11. – С. 39–44.
9. Садакова Н.М. Анализ осадок сооружений средствами математической статистики // Публикации Московского института железнодорожного транспорта. – 1971. – № 378. – С. 40–53.
10. Барлиани А.Г. Математические методы обработки и анализа пространственных данных на ЭВМ. – Новосибирск: СГУГиТ, 2017. – 145 с.

REFERENCES

1. Zaitsev, A.K., Marfenko, S.V., Mikhelev, D.Sh., Vasyutinskii, I.Yu., Klyushin, E.B., Ivanov, M.V. & Yambaev Kh.K. (1991). *Geodezicheskie metody issledovaniya deformatsii sooruzhenii*. Moscow: Nedra. (In Russ.).

2. Gulyaev, Yu.P. (2008). *Prognozirovanie deformatsii sooruzhenii na osnove rezul'tatov geodezicheskikh nablyudenii: monogr.* Novosibirsk: SGGA. (In Russ).
3. Pavlov, A.I. (2016). Tsifrovoye modelirovanie pri monitoringe deformatsii [Digital modeling in monitoring deformation]. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii [Educational Resources and Technologies]*, 4(16), 98–106. (In Russ, abstr. in Engl.). DOI: 10.21777/2312-5500-2016-4-98-106.
4. Gan'shin, V.N., Storozhenko, A.F., Il'in, A.G. & Budenkov, N.A. (1981). *Izmerenie vertikal'nykh smeshchenii sooruzhenii i analiz ustoichivosti reperov.* Moscow: Nedra. (In Russ).
5. Gridchin, A.N. (1973). *Vybor optimal'nogo metoda podbora uravnenii osadok pri ikh prognozirovanii. Metody inzhenernoi geodezii v irrigatsionnom i gidrotekhnicheskom stroitel'stve.* Rostov-na-Donu. (In Russ).
6. Mikhelev, D.Sh., Runov, I.V. & Golubtsov, A.I. (1977). *Geodezicheskie izmereniya pri izuchenii deformatsii krupnykh inzhenernykh sooruzhenii.* Moscow: Nedra. (In Russ).
7. Nesterenok, M.S. (1972). O prognozirovanii zatukhayushchei osadki. *Geodeziya i aerofotos"emka*, (4), 77–81. (In Russ).
8. Novak, V.E., Gorelov, V.A. & Yambaev, Kh.K. (1975). Veroyatnostno-statisticheskii analiz rezul'tatov stvornykh izmerenii, proizvodimyykh opticheskim metodom. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Proektirovanie*, (11), 39–44. (In Russ).
9. Sadakova, N.M. (1971). Analiz osadok sooruzhenii sredstvami matematicheskoi statistiki. *Publikatsii Moskovskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*, (378), 40–53. (In Russ).
10. Barliani, A.G. (2017). *Matematicheskie metody obrabotki i analiza prostranstvennykh dannykh na EVM.* Novosibirsk: SGUGiT. (In Russ).

Поступила 21.09.2024

ANALYSIS OF STRUCTURE DEFORMATIONS VIA LINEAR REGRESSION

V. KASHURA, I. RAK
(Belarusian National Technical University, Minsk)

In this article, mathematical methods for analysis of displacement of deformation marks installed at an active subway tunnel were explored with the purpose of forecasting the change of the values of vertical and horizontal displacements of deformation marks. The values of vertical and horizontal displacements of deformation marks from the positions at the start of measurements are calculated. Using linear regression analysis, positive linear correlations between horizontal and vertical displacement values and elapsed time are found on a short time interval. The possibility of using artificial intelligence for solving this problem is discussed.

Keywords: structure deformation, deformation forecasting, deformation analysis, linear regression, artificial intelligence.

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Колтунов А.И., Хаткевич А.М.</i> Нелинейный расчет трубобетонных элементов с круглыми трубами при изгибе	2
<i>Романюк В.Н., Нияковский А.М., Струцкий Н.В.</i> Предиктивная аналитика объектов газораспределительной системы Республики Беларусь: текущее состояние и перспективы	12
<i>Васильев А.А., Кабышева Ю.К., Ткачева М.И.</i> Расчетно-экспериментальные зависимости начальной карбонизации бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15} \dots C^{50}/_{60}$	19
<i>Кравцов В.Н., Эгбалник С.М.</i> Имплементация процесса научно-технического сопровождения строительства и системы геотехнического мониторинга при возведении и эксплуатации сооружений	28
<i>Марковцова В.В., Парфенова Л.М., Закревская Л.В.</i> Тяжелый бетон морозостойкостью F400 с комплексными химическими добавками	38
<i>Рашкевич Е.И.</i> Экологические аспекты внутрипластовой обработки подземных вод в скважинах для малых населенных пунктов	46
<i>Соловьев А.А.</i> Итоги натурных исследований подполья и стен дома XIX века (здание бывшего «Гранд Отеля») по проспекту Ф. Скорины, 5 в городе Полоцке	50

ГЕОДЕЗИЯ

<i>Кацура В.Н., Рак И.Е.</i> Анализ деформаций инженерных сооружений методом линейной регрессии	61
---	----