

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Tom I.
Rok 1818.

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

№ 1(36), 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 ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

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

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

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

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

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

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

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

Подписано к печати 15.04.2024. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84^{1/8}. Ризография.
Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 14,02. Тираж 50 экз. Заказ 154.

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 628.11(628.16)

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-2-13

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УДАЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА
В ПРОЦЕССЕ ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Е.И. РАШКЕВИЧ¹⁾, канд. техн. наук **В.Д. ЮЩЕНКО²⁾**,
д-р физ.-мат. наук **Е.К. МАКАРОВ³⁾**, д-р физ.-мат. наук **А.К. ДЕМЕНЧУК⁴⁾**
(^{1), 2)} Витебское областное коммунальное унитарное предприятие
водопроводно-канализационного хозяйства «Витебскоблводоканал»,
(^{3), 4)} Государственное научное учреждение «Институт математики
Национальной академии наук Беларуси»
¹⁾ selenapuko@gmail.com, ²⁾ yuvd46@mail.ru, ³⁾ jcm@im.bas-net.by, ⁴⁾ demenchuk@im.bas-net.by

В статье показано, что приведенные в литературных источниках краевые условия для системы уравнений модели, описывающих процесс внутрипластовой обработки подземной воды, содержат неточности и опечатки и не дают возможности получить решение, отвечающее реальным условиям. Для нахождения такого решения предложена постановка краевого условия на концентрацию осажденного кислорода на подвижной границе контакта подземных вод и ранее закачанной аэрированной воды.

Ключевые слова: метод внутрипластовой обработки подземных вод, концентрация осажденного кислорода в водоносных слоях, краевые условия контакта подземных вод с адсорбированным кислородом, математическая модель окисления железа.

Введение. Метод обезжелезивания воды непосредственно в водоносном пласте скважин *in-situ* в исполнении системы *Subterra* для малых населенных пунктов был реализован в Витебской области на примере спаренных скважин [1]. Сущность этого метода состоит в том, что в каждой отдельной скважине, непосредственно внутри водоносного пласта, происходят все стадии процесса обработки подземных вод¹ [2; 3]. Главной из них, от которой зависят все последующие, является закачка обогащенной кислородом воды в водоносный пласт. В ее ходе осуществляется закрепление кислорода на породах пласта (их «зарядка» кислородом) и создание внутрипластовой окислительной зоны. Заключительной же стадией является откачка подземных вод через предварительно созданную окислительную зону. При этом происходит окисление растворенных в подземных водах соединений железа и их иммобилизация на породах пласта.

Для успешного применения этого метода необходимо знать гидрогеологические условия и параметры состояния водоносных слоев скважин, предназначенных для применения этого метода [4–7].

Г.М. Коммунаром была предложена математическая модель процессов, происходящих при применении данного метода. Эта модель описана в [8, глава 21], где, однако, не приводится ряд существенных промежуточных выкладок, что затрудняет ее практическое использование. Для уравнений модели, описывающих процесс окисления железа, приведены основные решения по выбранным заданным граничным и начальным условиям, но не указан способ их получения. При этом имеет место несоответствие предъявляемых решений и граничных условий.

В связи с этим в предыдущей статье [9] был проведен детальный анализ математического аппарата модели Г.М. Коммунара в части, относящейся к процессу закрепления кислорода и создания окислительной зоны, в результате восстановлены недостающие выкладки, устранены обнаруженные неточности и представлена уточненная математическая модель зарядки пласта кислородом.

Цель и задачи работы. Данная статья – продолжение предыдущей, и главной целью является применение ранее полученной уточненной модели к основной поставленной задаче: на базе результатов предыдущей статьи о распределении кислорода (несколько фиктивных, ибо там распределение достаточно искусственное, о чем и сказано в [9]) получить уточненную модель окисления железа. Для этого выполнен более детальный анализ математического аппарата модели Г.М. Коммунара в части, относящейся к процессу окисления железа, с обоснованием краевых условий, которые адекватны рассматриваемой задаче, также полностью восстанавливается процесс получения соответствующих уравнений.

Таким образом, предмет исследований в настоящей статье: анализ математической составляющей модели Коммунара, восполнение недостающих вычислений, установление неточностей и их исправление на основе знаний о реально протекающих процессах.

¹ Коммунар Г.М. Внутрипластовая очистка подземных вод для целей водоснабжения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.04 / НИИ ВОДГЕО. – М., 1987. – 39 с.

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

В совокупности результаты настоящей работы и статьи [9] позволят в дальнейшем обосновать методику расчета систем водоснабжения малых населенных пунктов без применения графоаналитического метода определения входящих в нее неизвестных параметров на основе экспериментальных данных, полученных непосредственно в водоносном пласте скважин *in-situ*.

Динамика окисления железа при равномерном начальном распределении адсорбированного кислорода. Для последующих рассуждений и выкладок принимаются обозначения, такие же, как в статье [9]. Некоторые уравнения могут повторяться в данной статье. Это связано с их влиянием на общий ход решения.

В анализируемой модели предполагается, что предварительно созданная при закачке обогащенной кислородом воды окислительная зона имеет вид цилиндра с высотой равной мощности пласта и осью, совпадающей с осью скважины. Начальное распределение кислорода предполагается равномерным в цилиндре радиуса R_0 , а в цилиндрическом кольце, заключенном между цилиндрами радиуса R_0 и r_f^* , осажденный кислород считается отсутствующим. Предполагается также, что потоки воды внутри пласта в процессе откачки являются радиальными, то есть направлены перпендикулярно оси скважины и направлены от нее вдоль радиусов цилиндра. При движении потока подземной воды через окислительную зону ее очистка происходит за счет реакции окисления ионов железа кислородом, осажденным на породах пласта, происходящей только на активированной поверхности этих пород без вовлечения в процесс кислорода, растворенного в воде.

В этих предположениях процесс окисления железа подземных вод в зоне «заряженного» кислородом водяного пласта описывается системой дифференциальных уравнений с частными производными:

$$n_0 \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial t} - \frac{q_0}{r} \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial r} + \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial t} = -\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}}. \quad (2)$$

Неизвестными в данной системе уравнений является пара функций двух переменных, зависящих от времени t и радиуса r , а также технологических и химических параметров процесса:

$$C_{Fe^{2+}} = C_{Fe^{2+}}(t, r) \text{ и } C_{\bar{O}_2} = C_{\bar{O}_2}(t, r).$$

Согласно [1, формулы 21.23а, 21.23б] процесс окисления железа при равномерном начальном распределении адсорбированного кислорода определяется краевыми условиями:

$$\begin{aligned} t = t^*, \quad r \leq R_0, \quad C_{\bar{O}_2}(t, r) = C_{Fe^{2+}}^*(t, r) = 0; \\ t \geq t^*, \quad r = R_0, \quad C_{Fe^{2+}}(t, r) = C_{Fe^{2+}}^*. \end{aligned}$$

Приведенные формулы содержат опечатку. Условия, соответствующие фактическим, таковы:

$$\begin{aligned} t = t^*, \quad r \leq R_0, \quad C_{\bar{O}_2}(t, r) = C_{\bar{O}_2}^*, \quad C_{Fe^{2+}}(t, r) = 0; \\ t \geq t^*, \quad r = R_0, \quad C_{Fe^{2+}}(t, r) = C_{Fe^{2+}}^*. \end{aligned}$$

Однако и эти, исправленные, условия не могут определять требуемое решение системы (1), (2), так как условие на кислород задано полностью в зоне ранее закачанной воды, а эта зона отделена от интересующей нас зоны взаимодействия подземных вод и осажденного на породах пласта кислорода границей контакта закачанной и подземной воды, по которой проходит разрыв функции $C_{Fe^{2+}}(t, r)$, на котором нет никаких условий сопряжения.

Расстояние от оси скважины до границы контакта закачанной и подземной воды $r_R(t)$ может быть определено из условия:

$$t = t^* + \frac{R_0^2 - r_R^2(t)}{2q_0} n_0. \quad (3)$$

Соответственно, область переменных (t, r) , в которой величины концентраций $C_{Fe^{2+}} = C_{Fe^{2+}}(t, r)$ и $C_{\bar{O}_2} = C_{\bar{O}_2}(t, r)$ определяются уравнениями (1) и (2), ограничена линией контакта (3) и двумя полупрямыми $t \geq t_0^*$, $r = r_0$, при этом краевое условие должно задаваться либо на границе этой области, либо на границе какой-либо ее подобласти. Точный вид правильного краевого условия, дающего нужное решение, будет приведен и обоснован ниже.

Введем замену независимых переменных t, r по формулам:

$$\begin{aligned}\lambda &= -\frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0; \\ \tau &= t - t^* + \lambda,\end{aligned}\quad (4)$$

где λ, τ – новые независимые переменные.

Найдем частные производные:

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial t} &= \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \lambda} \frac{d\lambda}{dt} + \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \lambda} 0 + \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tau} 1 = \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial r} &= \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \lambda} \frac{d\lambda}{dr} + \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial r} = \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \lambda} \frac{2n_0 r}{2q_0} + \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tau} \frac{2n_0 r}{2q_0} = \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \lambda} \frac{n_0 r}{q_0} + \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tau} \frac{n_0 r}{q_0}; \\ \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial t} &= \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \lambda} \frac{d\lambda}{dt} + \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \lambda} 0 + \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tau} 1 = \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial r} &= \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \lambda} \frac{d\lambda}{dr} + \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial r} = \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \lambda} \frac{2n_0 r}{2q_0} + \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tau} \frac{2n_0 r}{2q_0} = \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \lambda} \frac{n_0 r}{q_0} + \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tau} \frac{n_0 r}{q_0}.\end{aligned}$$

С новыми независимыми переменными система (1), (2) примет вид

$$\begin{aligned}n_0 \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tau} - \frac{q_0}{r} \left(\frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \lambda} \frac{n_0 r}{q_0} + \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tau} \frac{n_0}{q_0} \right) + \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}} &= 0; \\ \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tau} &= -\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}},\end{aligned}$$

или, после раскрытия скобок

$$\begin{aligned}n_0 \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tau} - \frac{q_0}{r} \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \lambda} \frac{n_0 r}{q_0} - \frac{q_0}{r} \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tau} \frac{n_0}{q_0} + \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}} &= 0; \\ \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tau} &= -\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}}\end{aligned}$$

и необходимых упрощений

$$\begin{aligned}n_0 \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \lambda} &= \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}}; \\ \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tau} &= -\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}}.\end{aligned}\quad (5)$$

В полученной системе выполним еще одну замену независимых переменных λ, τ по формулам:

$$\begin{aligned}\tilde{\lambda} &= \frac{\sigma_{Fe^{2+}}}{n_0} \lambda; \\ \tilde{\tau} &= -\beta \sigma_{Fe^{2+}} \tau,\end{aligned}\quad (6)$$

где $\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}$ – новые независимые переменные.

Вычисляя частные производные

$$\frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \lambda} = \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tilde{\lambda}} \frac{d\tilde{\lambda}}{d\lambda} = -\frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tilde{\lambda}} \frac{\sigma_{Fe^{2+}}}{n_0};$$

$$\frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tau} = \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tilde{\tau}} \frac{d\tilde{\tau}}{d\tau} = -\beta \sigma_{Fe^{2+}} \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tilde{\tau}}$$

и подставляя их в систему, получим

$$-n_0 \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tilde{\lambda}} \frac{\sigma_{Fe^{2+}}}{n_0} = -\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}};$$

$$\frac{\beta \sigma_{Fe^{2+}}}{n_0} \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tilde{\tau}} = \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}}$$

или

$$\frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial \tilde{\lambda}} = C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial \tilde{\tau}} = C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}},$$

где

$$\tilde{\lambda} = \frac{\sigma_{Fe^{2+}}}{n_0} \lambda; \quad \lambda = -\frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0;$$

$$\tilde{\tau} = -\beta \sigma_{Fe^{2+}} \tau; \quad \tau = t - t^* + \lambda.$$

Для того чтобы получить общее решение системы (7) независимо от налагаемых на входящие в нее физические величины дополнительных условий, рассмотрим вспомогательную нелинейную систему дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = uv; \quad \frac{\partial v}{\partial y} = uv,$$

где x, y – независимые переменные;

$u = u(x, y)$ и $v = v(x, y)$ – неизвестные скалярные функции.

Будем считать, что искомые функции u и v определены, непрерывны и положительны на некотором множестве Ω , и имеют на этом множестве смешанные производные второго порядка.

Разделим первое уравнение вспомогательной системы на u , а второе – на v :

$$\frac{\partial u}{u \partial x} = v; \quad \frac{\partial v}{v \partial y} = u. \quad (8)$$

Прологарифмируем:

$$\frac{\partial(\ln u)}{\partial x} = v; \quad \frac{\partial(\ln v)}{\partial y} = u. \quad (9)$$

Продифференцируем обе части первого уравнения по y , а второго – по x :

$$\frac{\partial^2}{\partial y \partial x} \ln u = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \ln v = \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (10)$$

Отметим, что в силу допущения о наличии смешанных производных второго порядка, порядок дифференцирования не имеет значения. Поэтому последнюю систему запишем в виде, где в правых частях стоят соответственно левые части вспомогательной системы:

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \ln u = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \ln v = \frac{\partial u}{\partial x}.$$

Тогда, с учетом строения вспомогательной системы, находим

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \ln u = uv; \quad \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \ln v = uv.$$

Вычитая почленно из первого уравнения второе, получим

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \ln u - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \ln v = 0 \quad (11)$$

или на основании правил дифференцирования и логарифмирования

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \ln u - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \ln v = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(\ln \frac{u}{v} \right) = 0.$$

В итоге вспомогательная система сводится к одному уравнению:

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(\ln \frac{u}{v} \right) = 0. \quad (12)$$

Выполним поэтапное интегрирование полученного уравнения, сначала по переменной y :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\ln \frac{u}{v} \right) = -C_1(x),$$

а затем по переменной x :

$$\ln \frac{u}{v} = C_1(x) + C_2(y),$$

где $C_1(x), C_2(y)$ – произвольные функции своих аргументов.

Поэтому последнее уравнение для удобства дальнейшего изложения можно записать в виде:

$$\ln \frac{u}{v} = -C_1(x) + C_2(y),$$

считая при этом, что $-C_1(x) + C_2(y) > 0$. Из полученного уравнения находим:

$$\frac{u}{v} = e^{-C_1(x) + C_2(y)} = \frac{e^{C_2(y)}}{e^{C_1(x)}},$$

откуда, приняв обозначения

$$e^{C_2(y)} = R(y); \quad e^{C_1(x)} = S(x),$$

можно получить следующие зависимости между искомыми функциями:

$$u = \frac{R(y)}{S(x)} v; \quad v = \frac{S(x)}{R(y)} u.$$

Тогда вспомогательная система примет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = u^2 \frac{S(x)}{R(y)}; \quad \frac{\partial v}{\partial y} = v^2 \frac{R(y)}{S(x)},$$

или после элементарных преобразований:

$$\frac{1}{u^2} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{S(x)}{R(y)}; \quad \frac{1}{v^2} \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{R(y)}{S(x)}. \quad (13)$$

Применяя правило дифференцирования сложной функции [10], из полученных уравнений находим выражения для частных производных, содержащих искомые функции:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u} \right) = \frac{S(x)}{R(y)}; \quad -\frac{\partial v}{\partial y} \left(\frac{1}{v} \right) = \frac{R(y)}{S(x)}.$$

Проинтегрируем обе части первого уравнения по x , а второго – по y :

$$\int -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u} \right) dx = \int \frac{S(x)}{R(y)} dx; \quad \int -\frac{\partial v}{\partial y} \left(\frac{1}{v} \right) dy = \int \frac{R(y)}{S(x)} dy,$$

получим:

$$-\frac{1}{u} = \frac{1}{R(y)} (\int S(x) dx + \varphi_1(y)); \quad -\frac{1}{v} = \frac{1}{S(x)} (\int R(y) dy + \varphi_2(x)),$$

где $\varphi_1(y), \varphi_2(x)$ – произвольные функции своих аргументов.

Из полученных соотношений находим общее решение вспомогательной системы:

$$u = -\frac{R(y)}{\int S(x) dx + \varphi_1(y)}; \quad v = -\frac{S(x)}{\int R(y) dy + \varphi_2(x)}, \quad (14)$$

считая при этом, что

$$u = \int S(x) dx + \varphi_1(y) \neq 0; \quad \int R(y) dy + \varphi_2(x) \neq 0; \quad (x, y) \in \Omega.$$

Введем обозначения:

$$\int R(y) dy = a(y); \quad \int S(x) dx = b(x),$$

из которых следует, что

$$R(y) = a'(y); \quad S(x) = b'(x).$$

Поэтому общее решение вспомогательной системы можно записать в виде:

$$u = \frac{-a'(y)}{b(x) + \varphi_1(y)}; \quad v = \frac{-b'(x)}{a(y) + \varphi_2(x)}, \quad (15)$$

где

$$e^{C_2(y)} = R(y); \quad e^{C_1(x)} = S(x); \quad a(y) = \int R(y) dy = \int e^{C_2(y)} dy; \quad b(x) = \int S(x) dx = \int e^{C_1(x)} dx.$$

Покажем, что между функциями $a(y)$ и $\varphi_1(y)$, а также $b(x)$ и $\varphi_2(x)$ существует зависимость. Для этого найдем частные производные:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{a'(y)b'(x)}{(b(x) + \varphi_1(y))^2}; \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{b'(x)a'(y)}{(a(y) + \varphi_2(x))^2}. \quad (16)$$

С другой стороны, в силу строения вспомогательной системы, получаем:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{a'(y)b'(x)}{(b(x) + \varphi_1(y))(a(y) + \varphi_2(x))}; \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{b'(x)a'(y)}{(b(x) + \varphi_1(y))(a(y) + \varphi_2(x))}.$$

Из полученных равенств следует, что знаменатели их правых частей равны между собой:

$$(b(x) + \varphi_1(y))^2 = (a(y) + \varphi_2(x))^2 = (b(x) + \varphi_1(y))(a(y) + \varphi_2(x)).$$

Значит:

$$b(x) + \varphi_1(y) = a(y) + \varphi_2(x)$$

или после группировки:

$$b(x) - \varphi_2(x) = a(y) - \varphi_1(y).$$

Так как левая часть полученного равенства является функцией только от x , а правая – функцией от y , то такое равенство возможно лишь тогда, когда эти функции постоянные:

$$b(x) - \varphi_2(x) = a(y) - \varphi_1(y) \equiv -C^* = \text{const.}$$

Следовательно:

$$\varphi_2(x) = b(x) + C^* \quad \varphi_1(y) = a(y) + C^*,$$

т.е. функции $a(y)$ и $\varphi_1(y)$, а также $b(x)$ и $\varphi_2(x)$ отличаются друг от друга на одну и ту же постоянную. Поскольку эти функции выбирались произвольными, то можно положить $C^* = 0$. Тогда

$$\varphi_2(x) = b(x) \quad \varphi_1(y) = a(y).$$

Таким образом, с учетом принятых обозначений находим общее решение вспомогательной системы:

$$u = \frac{-a'(y)}{b(x) + a(y)}; \quad v = \frac{-b'(x)}{a(y) + b(x)}, \quad (17)$$

где $a(y) = \int e^{C_2(y)} dy$, $b(x) = \int e^{C_1(x)} dx$;

$C_1(x)$, $C_2(y)$ – произвольные функции своих аргументов, удовлетворяющие условию: $-C_1(x) + C_2(y) > 0$.

Заметим, что последнее условие является следствием способа получения общего решения и не является обязательным. Нетрудно проверить, что функции (17) удовлетворяют вспомогательной системе при любом выборе дифференцируемых функций $a(y)$, $b(x)$ всюду, где их сумма отлична от нуля.

Так как система (15) является полным аналогом вспомогательной системы, общее решение которой найдено:

$$u = \frac{-a'(\tilde{\tau})}{b(\tilde{\lambda}) + a(\tilde{\tau})}; \quad v = \frac{-b'(\tilde{\lambda})}{a(\tilde{y}) + b(\tilde{x})},$$

общее решение системы имеет такую же структуру:

$$C_{Fe^{2+}}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}) = \frac{-a'(\tilde{\tau})}{b(\tilde{\lambda}) + a(\tilde{\tau})}; \quad C_{\bar{O}_2}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}) = \frac{-b'(\tilde{\lambda})}{b(\tilde{\lambda}) + a(\tilde{\tau})}. \quad (18)$$

Граничные условия, обеспечивающие получение нужного решения, имеют вид:

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda} &= 0; & C_{Fe^{2+}}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}) &= C_{Fe^{2+}}; \\ \tilde{\tau} &= 0; & C_{\bar{O}_2}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}) &= C_{\bar{O}_2}^*; \quad C_{Fe^{2+}} = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Первое условие совпадает с тем, что приведено в [8, глава 21], а именно: за наиболее дальним от скважины положением фронта адсорбции содержание железа такое же, как и в подземных водах (так как в этой зоне находятся только они). Второе условие задано на подвижной границе контакта закачанной и подземной воды и показывает, что в первый момент контакта заряженных кислородом пород и движущихся по направлению к скважине подземных вод концентрация адсорбированного кислорода максимальна. Подставим принятые граничные условия в общее решение.

1) При $\tilde{\lambda} = 0$ имеем:

$$C_{Fe^{2+}}(0, \tilde{\tau}) = \frac{-a'(\tilde{\tau})}{b(0) + a(\tilde{\tau})} = C_{Fe^{2+}},$$

откуда получаем линейное обыкновенное дифференциальное уравнение для нахождения коэффициента $a(\tilde{\tau})$:

$$a'(\tilde{\tau}) + C_{Fe^{2+}} a(\tilde{\tau}) = -C_{Fe^{2+}} b(0).$$

Общее решение этого уравнения находится как сумма общего решения соответствующего однородного уравнения и некоторого частного решения неоднородного:

$$a(\tilde{\tau}) = Be^{-C_{Fe^{2+}} \tilde{\tau}} - b(0), \quad (20)$$

где B – произвольная вещественная постоянная.
Тогда:

$$a(0) = Be^{-C_{Fe^{2+}} \cdot 0} - b(0) = B - b(0). \quad (21)$$

2) При $\tilde{\tau} = 0$ имеем:

$$C_{\bar{O}_2}(\tilde{\lambda}, 0) = \frac{-b'(\tilde{\lambda})}{b(\tilde{\lambda}) + a(0)} = C_{\bar{O}_2}^*,$$

откуда получаем линейное обыкновенное дифференциальное уравнение для нахождения коэффициента $b(\tilde{\lambda})$:

$$b'(\tilde{\lambda}) + C_{\bar{O}_2}^* b(\tilde{\lambda}) = -C_{\bar{O}_2}^* a(0).$$

Общее решение этого уравнения также находится стандартным образом:

$$b(\tilde{\lambda}) = De^{-C_{\bar{O}_2}^* \tilde{\lambda}} - a(0), \quad (22)$$

где D – произвольная вещественная постоянная, при этом

$$b(0) = D - a(0).$$

Как видим, значения $a(0)$, $b(0)$ связаны следующими равенствами:

$$a(0) = B - b(0); \quad b(0) = D - a(0),$$

из которых следует, что

$$B = D = a(0) + b(0).$$

Обозначим:

$$B = D = a(0) + b(0) = K.$$

Тогда формулы для коэффициентов $a(\tilde{\tau})$ и $b(\tilde{\lambda})$ примут вид:

$$a(\tilde{\tau}) = Ke^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - b(0);$$

$$b(\tilde{\lambda}) = Ke^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} - a(0).$$

Подставляя коэффициенты $a(\tilde{\tau})$, $b(\tilde{\lambda})$ в общее решение, находим решение поставленной краевой задачи:

$$\begin{aligned} C_{Fe^{2+}}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}) &= \frac{-\left(Ke^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - K\right)'}{Ke^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} - b(0) + Ke^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - a(0)} = \\ &= \frac{KC_{Fe^{2+}}e^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}}}{Ke^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} + Ke^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - (a(0) + b(0))} = \frac{KC_{Fe^{2+}}e^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}}}{Ke^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} + Ke^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - K} = \\ &= \frac{C_{Fe^{2+}}e^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}}}{e^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} + e^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - 1}; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} C_{\bar{O}_2}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}) &= \frac{-\left(Ke^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} - K\right)'}{Ke^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} - a(0) + Ke^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - b(0)} = \\ &= \frac{KC_{\bar{O}_2}^*e^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}}}{Ke^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} + Ke^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - (a(0) + b(0))} = \frac{KC_{\bar{O}_2}^*e^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}}}{Ke^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} + Ke^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - (a(0) + b(0))} = \\ &= \frac{KC_{\bar{O}_2}^*e^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}}}{Ke^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} + Ke^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - K} = \frac{C_{\bar{O}_2}^*e^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}}}{e^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} + e^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - 1}. \end{aligned} \quad (24)$$

Произведем преобразование полученных формул.

Нами выведены формулы (первая и вторая) решения граничной задачи для системы (9):

$$C_{Fe^{2+}}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}) = \frac{C_{Fe^{2+}}e^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}}}{e^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} + e^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - 1}; \quad (25)$$

$$C_{\bar{O}_2}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}) = \frac{C_{\bar{O}_2}^*e^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}}}{e^{-C_{\bar{O}_2}^*\tilde{\lambda}} + e^{-C_{Fe^{2+}}\tilde{\tau}} - 1}, \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda} &= \frac{\sigma_{Fe^{2+}}}{n_0} \lambda; & \lambda &= -\frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0; \\ \tilde{\tau} &= -\beta \sigma_{Fe^{2+}} \tau; & \tau &= t - t^* + \lambda. \end{aligned}$$

Для сравнения этих формул с формулами [8] предварительно получим соотношение между новыми $\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}$ и исходными независимыми переменными t, r :

$$\begin{aligned}\tilde{\lambda} &= \frac{\sigma_{Fe^{2+}}}{n_0} \lambda = \frac{\sigma_{Fe^{2+}}}{n_0} \left(-\frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0 \right) = -\frac{\sigma_{Fe^{2+}} (R_0^2 - r^2)}{2q_0}; \\ \tilde{\tau} &= -\beta \sigma_{Fe^{2+}} \tau = -\beta \sigma_{Fe^{2+}} \left(t - t^* - \frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0 \right) = -\beta \sigma_{Fe^{2+}} \left(t - t^* - \frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0 \right).\end{aligned}$$

Сначала подставим эти соотношения в первую из формул:

$$C_{Fe^{2+}}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}) = \frac{C_{Fe^{2+}} e^{-C_{Fe^{2+}} \left(\beta \sigma_{Fe^{2+}} \left(t - t^* - \frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0 \right) \right)}}{e^{-C_{\bar{O}_2}^* \left(-\frac{(R_0^2 - r^2) \sigma_{Fe^{2+}}}{2q_0} \right)} + e^{-C_{Fe^{2+}} \left(\beta \sigma_{Fe^{2+}} \left(t - t^* - \frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0 \right) \right)} - 1},$$

откуда имеем:

$$\frac{C_{Fe^{2+}}(t, r)}{C_{Fe^{2+}}} = \frac{e^{\beta C_{Fe^{2+}} \sigma_{Fe^{2+}} \left(t - t^* - \frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0 \right)}}{e^{C_{\bar{O}_2}^* \frac{(R_0^2 - r^2) \sigma_{Fe^{2+}}}{2q_0}} + e^{\beta C_{Fe^{2+}} \sigma_{Fe^{2+}} \left(t - t^* - \frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0 \right)} - 1}$$

Подставим далее значения $\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}$ во вторую из формул:

$$C_{\bar{O}_2}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau}) = \frac{C_{\bar{O}_2}^* e^{-C_{\bar{O}_2}^* \left(-\frac{(R_0^2 - r^2) \sigma_{Fe^{2+}}}{2q_0} \right)}}{e^{-C_{\bar{O}_2}^* \left(-\frac{(R_0^2 - r^2) \sigma_{Fe^{2+}}}{2q_0} \right)} + e^{C_{Fe^{2+}} \left(\beta \sigma_{Fe^{2+}} \left(t - t^* - \frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0 \right) \right)} - 1},$$

откуда имеем:

$$\frac{C_{\bar{O}_2}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau})}{C_{\bar{O}_2}^*} = \frac{e^{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^* \frac{R_0^2 - r^2}{2q_0}}}{e^{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^* \frac{R_0^2 - r^2}{2q_0}} + e^{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}} \left(t - t^* - \frac{R_0^2 - r^2}{2q_0} n_0 \right)} - 1}.$$

Обозначим:

$$\begin{aligned}T &= \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}} \left(t - t^* - \frac{n_0 (R_0^2 - r^2)}{2q_0} \right); \\ X &= \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^* \frac{(R_0^2 - r^2)}{2q_0}.\end{aligned}$$

После этого получаем решение поставленной задачи в виде, почти полностью совпадающем с решением, приведенным в [8], за исключением опечатки: в соответствующих формулах ошибочно присутствует величина $C_{\bar{O}_2}^*$, которую следует заменить на $C_{\bar{O}_2}^*$:

$$\frac{C_{Fe^{2+}}(t,r)}{C_{Fe^{2+}}} = \frac{e^T}{e^X + e^T - 1}; \quad (27)$$

$$\frac{C_{\bar{O}_2}(\tilde{\lambda}, \tilde{\tau})}{C_{\bar{O}_2}^*} = \frac{e^X}{e^X + e^T - 1}. \quad (28)$$

Заключение. Метод обезжелезивания воды непосредственно в водоносном пласте скважин *in-situ* в исполнении системы *Subterra* может быть применен для малых населенных пунктов.

Для более успешного рассмотрения протекания различных процессов в водоносных пластах необходимо получить математическую модель окисления и удаления железа из подземной воды.

В предложенном Г.М. Коммунаром решении по получению математической модели [8] не приводится ряд существенных промежуточных выкладок, что затрудняет ее практическое использование. При этом имеет место несоответствие предъявляемых решений и граничных условий.

Нами в статье [9] был проведен детальный анализ математического аппарата модели Г.М. Коммунара в части, относящейся к процессу закрепления кислорода и создания окислительной зоны, в результате восстановлены недостающие выкладки, устранены обнаруженные неточности и представлена уточненная математическая модель зарядки пласта кислородом. Но даже в исправленном виде полученные решения не дают возможности решить эту задачу по механизму окисления железа в водоносном пласте. Для его получения требуется реальная постановка краевого условия концентрации осажденного кислорода на границе контакта подземных вод и ранее закачанной аэрированной воды.

В данной статье, которая является продолжением предыдущей, приводится путь получения уточненной математической модели окисления и удаления железа с обоснованием краевых условий, которые адекватны к рассматриваемой задаче, с полным обоснованием получения соответствующих ей решений. В анализируемой модели предполагается, что предварительно созданная при закачке обогащенной кислородом воды окислительная зона имеет вид цилиндра с высотой равной мощности пласта и осью, совпадающей с осью скважины. При движении потока подземной воды через окислительную зону в стадии откачки в водопроводную сеть удаление железа происходит за счет реакции окисления кислородом, который адсорбирован на породах пласта, без участия кислорода, растворенного в воде.

В дальнейшем это позволит обосновать методику расчета систем водоснабжения малых населенных пунктов без применения графоаналитического метода определения входящих в нее неизвестных параметров на основе экспериментальных данных, полученных непосредственно в водоносном пласте скважин *in-situ*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д. Закачка воды в подземный водоносный пласт скважины из пылевидного и средне-мелкозернистого песка при малом водопотреблении // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Стр-во. Приклад. науки. – 2022. – № 14(3). – С. 64–70.
2. Кулаков В.В. Использование внутрипластовой очистки подземных вод от железа и марганца (на примере водоснабжения г. Хабаровск) // Вестн. ДВО РАН. – 2013. – № 2. – С. 84–89.
3. Braester C., Martinell R. The Vyredox and Nytrebox method in-situ treatment of groundwater // Wat. Sci. Tech. – 1988. – Vol. 20, № 3. – P. 149–163.
4. Гуринович А.Д., Ваврженюк П., Ельский И. Возможности удаления из воды железа в водоносном пласте на примере существующих водозаборных скважин // Вода и экология: проблемы и решения. – 2013. – Т. 2, № 54. – С. 12–20.
5. Гледко Ю.А. Гидрогеология. – Минск: Выш. шк., 2012. – 446 с.
6. Кудельский А.В., Пашкевич В.И. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод Беларуси. – Минск: Бел. наука, 2014. – 261 с.
7. Ленченко Н.Н. Динамика подземных вод (теоретический курс). – М.: МГТУ, 2004. – 209 с.
8. Плотников Н.А., Алексеев В.С. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. – М.: Стройиздат, 1990. – 256 с.
9. Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д., Макаров Е.К., Деменчук А.К. Уточненная математическая модель «зарядки» кислородом водовмещающих пород в процессе внутрипластовой обработки подземных вод // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Стр-во. Приклад. науки. – 2023. – № 2(34). – С. 38–46.
10. Степанов В.В. Курс дифференциальных уравнений. – М.: УРСС, 2006. – 472 с.

REFERENCES

1. Rashkevich, E.I. & Yushchenko, V.D. (2022). Zakachka vody v podzemnyi vodonosnyi plast skvazhiny iz pylevidnogo i sredne-melkozernistogo peska pri malom vodopotreblenii [Water injection into the underground aquifer of the well from pulverized and medium-fine-grained sand at low water consumption]. *Vestn. Polots. gos. un-t. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 14(3), 64–70. DOI: 10.52928/2070-1683-2022-32-14-64-70. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Kulakov, V.V. (2013). Ispol'zovanie vnutriplastovoi ochistki podzemnykh vod ot zheleza i margantsa (na primere vodosnabzheniya g. Khabarovsk) [Use in situ treatment of groundwater from iron and manganese (by the example of water supply in Khabarovsk)]. *Vestn. DVO RAN [Vestnik FEB RAS]*, (2), 84–89. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Braester, C. & Martinell, R. (1988). The Vyredox and Nytrebox method in-situ treatment of groundwater. *Wat. Sci. Tech.*, 20(3), 149–163.
4. Gurinovich, A.D., Vavrzhenyuk, P. & El'skii, I. (2013). Vozmozhnosti udaleniya iz vody zheleza v vodonosnom plaste na primere sushchestvuyushchikh vodozabomnykh skvazhin [Possibilities of removing iron from water in an aquifer using the example of existing water wells]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya [Water and ecology: problems and solutions]*, 2 (54), 12–20. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Gledko, Yu.A. (2012). *Gidrogeologiya*. Minsk: Vysh. shk. (In Russ.).
6. Kudel'skii, A.V. & Pashkevich, H.I. (2014). *Regional'naya gidrogeologiya i geokhimiya podzemnykh vod Belarusi*. Minsk: Bel. navuka. (In Russ.).
7. Lenchenko, N.N. (2004). *Dinamika podzemnykh vod (teoreticheskii kurs)*. Moscow: MSGU. (In Russ.).
8. Plotnikov, N.A. & Alekseev, V.S. (1990). *Proektirovanie i ekspluatatsiya vodozaborov podzemnykh vod*. Moscow: Stroiidat. (In Russ.).
9. Rashkevich, E.I., Yushchenko, V.D., Makarov, E.K. & Demenchuk, A.K. (2023). Utochnennaya matematicheskaya model' «zaryadki» kislorodom vodovmeshchayushchikh porod v protsesse vnutriplastovoi obrabotki podzemnykh vod [Analysis of the mathematical model of "charging" oxygen of water-bearing rocks in the process of in-situ treatment of groundwater]. *Vestn. Polots. gos. un-t. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 2(34), 38–46. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-34-2-38-46. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Stepanov, V.V. (2006). *Kurs differentsial'nykh uravnenii*. Moscow: URSS. (In Russ.).

Поступила 18.01.2024

MATHEMATICAL MODEL OF IRON REMOVAL IN THE PROCESS OF IN-SITU TREATMENT OF GROUNDWATER

H. RASHKEVICH¹⁾, V. YUSHCHENKO²⁾, E. MAKAROV³⁾, A. DEMENCHUK⁴⁾

^{1), 2)} *Vitebsk Regional Municipal Unitary Enterprise of water supply and sewage "Vitebskoblvodokanal",*

^{3), 4)} *State Scientific Institution "Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus")*

The article shows that the boundary conditions given in the literature for the system of model equations describing the process of in-situ treatment of groundwater contain inaccuracies and typos and do not make it possible to obtain a solution that meets real conditions. To find such a solution, a boundary condition is proposed for the concentration of deposited oxygen at the mobile boundary of the contact of groundwater and previously injected aerated water.

Keywords: method of in-situ treatment of groundwater, concentration of deposited oxygen in aquifers, boundary conditions of contact of groundwater with adsorbed oxygen, mathematical model of iron oxidation.

UDC 691.3

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-14-20

COMPARATIVE STUDY ON THE APPLICABILITY OF NON-METALLIC NANOFIBERS AND REED FIBERS IN CONCRETE

X. WANG¹⁾, H. YU²⁾, E. SADOVSKAYA³⁾, PhD, associate prof. S. KOVSHAR⁴⁾,Doctor of Engineering, prof. S. LEONOVICH⁵⁾⁽¹⁾⁻⁵⁾ Belarusian National Technical University, Minsk¹⁾ wxp-phd@bntu.by, ²⁾ yuhaoxuan2001@gmail.com,³⁾ sadovcskaya@bntu.by, ⁴⁾ kovsharsn@bntu.by, ⁵⁾ leonovich@bntu.by

This article mainly conducts mechanical and mechanical experiments on non-metallic nanofiber concrete and non-metallic reed fiber concrete. Through relevant mechanical experimental data, the mechanical properties of the two fibers are compared in detail and the structures of the two fibers in concrete are determined. Durability, environmental protection, chemical stability and physical and mechanical properties hope to provide reference for the development of non-metallic fiber concrete materials.

Keywords: non-metallic fiber, nanofiber, reed fiber, concrete.

Introduction. Ordinary cement composites have low tensile strength and limited strain capacity. This results in the formation of nanocracks at relatively low tensile loads. These nanocracks have a significant impact on the durability of the cement matrix. In order to achieve the Sustainable Development Goals, people have begun using nanomaterials in significant quantities in building materials. Konsta-Gedutes et al. showed that the addition of carbon nanotubes (CNTs) as reinforcement materials can control nanoscale cracks [1]. Carbon nanofibers (CNFs) can significantly enhance the mechanical properties of nanocomposites by serving as effective reinforcing materials in cement composites. This is due to their excellent material properties, such as high stiffness, tensile strength, excellent electrical and thermal conductivity, and corrosion resistance [2; 3]. In addition, the physical structure of CNF (cellulose nanofiber) presents many exposed edges along the surface. These exposed edges may create a p-region that interacts with cement hydration products, resulting in significant changes in nanoscale mechanical properties, including strength, durability, fracture resistance, and more. Reed fiber reinforced concrete is a type of concrete that utilizes reed fiber as a reinforcing material. It offers unique mechanical properties and environmental advantages. As a natural fiber material, reed fiber possesses characteristics such as lightweight, high strength, low thermal conductivity, and renewability. These qualities make reed fiber reinforced concrete highly promising for various applications in the construction industry¹. Meheddene Machaka, Jamal Khatib, and Safaa Baydoun prepared four concrete mixtures. They added reed fiber ranging from 0% to 1,5% and used a water-cement ratio of 0,5%. Additionally, they treated the reed fibers, which were 40 mm long and 2 mm wide, with a 4% concentration of NaOH solution. Tests include compressive strength, density, total water absorption, and capillary water absorption. Studies have shown that the incorporation of reed fiber-infused concrete can decrease water absorption by up to 45% in cases of complete immersion and capillary action. There is minimal reduction in the density and strength of reed fiber reinforced concrete. The optimal addition of fiber in reed fiber reinforced concrete is 1,5%. This method is a viable approach for producing environmentally friendly materials that can be used to create sustainable building materials with adequate mechanical and durability properties [4] (Cardinale & Arleo). The addition of reed fiber can effectively enhance the tensile strength and crack resistance of concrete, resulting in improved seismic and wind resistance. It can also improve the frost resistance and durability of concrete, reduce concrete shrinkage and cracking, and prolong the service life of buildings [5]. Reed fiber can also improve the thermal insulation performance of concrete, reduce energy consumption, and achieve the goal of building energy efficiency [6]. Therefore, this paper analyzes the mechanical properties of nanofiber concrete and reed fiber-reinforced concrete. It then discusses the practical applications of these two types of fiber-reinforced concrete, providing relevant references for readers.

1. Materials and Methods

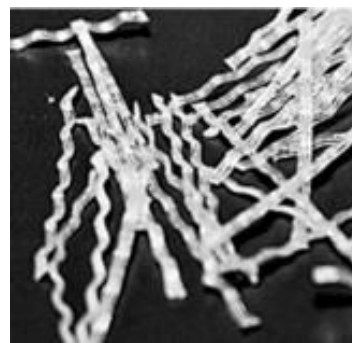
1.1 Experimental Materials

R42,5 ordinary Portland cement is used, the main chemical composition is showed in table 1, mechanical properties are showed in table 2. The natural coarse aggregate consists of ordinary gravel with a particle size of 0/5 (5–10 mm) and 1/2 (10–20 mm). The gradation is continuous. The fine aggregate is natural river sand from Minsk Sea. The mixing water used is laboratory tap water. The reed fiber used is treated with a 4% NaOH solution in wells. The reed fiber has a length of 40 mm, width of 3–5 mm, diameter of 0,45 mm, and density of 1,7 g/cm³. The unprocessed reeds are shown in figure 1, a, the processed reeds are shown in figure 1, b. The purity of the nanofiber is greater than 99,9%. The reed fiber has an outer diameter of 200–600 nm and a length of 5–50 μm. It also has a specific surface area of 18 m²/g and a conductivity greater than 100 sec/cm, is shown in figure 2. The mix ratio design is based on a substitution rate of 0–6%. The target design strength is C25, and the design standard slump is 180–220 mm. The material's mix ratio is shown in table 3.

Table 1. – The main component of cement, %

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO
63,11	23,32	7,43	3,36	1,1	0,75	0,56	0,37

¹ Jaafer, B.S., Majeed, A.H. & Kadhim, M.J. (2020). Physical and Mechanical Properties of Reed Fiber Cement Board // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 928(2), 022054. DOI: 10.1088/1757-899X/928/2/022054.

*a**b***Figure 1. – Reed fiber****Figure 2. – Nanofiber [13]****Table 2. – Mechanical properties**

Standard Consistency Water Requirement, %	Specific surface area, m ² /kg	Coagulation time, min		Compressive strength, MPa		Flexural strength, MPa	
		Initial setting	Finalization	3 d	28 d	3 d	28 d
28	360	175	235	27,5	49,0	5,5	8,0

Table 3. – Mix ratio of materials

r, %	Water-cement ratio	The amount of concrete material is kg/m ³							
		cement	water	sand	Natural coarse aggregates		Reed fibers	Nanofibers	Water reducer
					0/5	1/2			
0%	0,45	400	180	730	330	770	0	0	4,0
1%	0,45	400	180	730	330	770	4	4	4,0
2%	0,45	400	180	730	330	770	8	8	4,0
3%	0,45	400	180	730	330	770	12	12	4,0
4%	0,45	400	180	730	330	770	16	16	4,0
5%	0,45	400	180	730	110	770	20	20	4,0
6%	0,45	400	180	730	110	770	24	24	4,0

1.2 Experimental design

According to the material design ratio mentioned above, the material ratio for a 100 mm×100 mm×100 mm mold is calculated as follows: cement, sand, water, and 1–6% nano-reed fiber in the proportions of 0,4 kg:0,6 kg:0,18 L:0,004 kg; 0,4 kg:0,6 kg:0,18 L:0,008 kg; 0,4 kg:0,6 kg:0,18 L:0,012 kg; 0,4 kg:0,6 kg:0,18 L:0,016 kg; 0,4 kg:0,6 kg:0,18 L:0,02 kg; and 0,4 kg:0,6 kg:0,18 L:0,024 kg. Compressive test specimens were subjected to axial compressive tests on standard cubic concrete specimens and fiber reinforced concrete specimens with different types and gradients using a DS2-1000N compressive strength tester. The test block is shown in figure 3 and the test is shown in figure 4.

**Figure 3. – Compression test block****Figure 4. – Verification process**

According to the material design ratio mentioned above, the material ratio for a 150 mm×150 mm×650 mm mold is calculated as follows: cement, sand, water, and 1–6% nano-reed fiber = 3,71 kg:5,58 kg:1,67 L:0,037 kg; = 3,71 kg:5,58 kg:1,67 L:0,074 kg; = 3,71 kg:5,58 kg:1,67 L:0,11 kg; = 3,71 kg:5,58 kg:1,67 L:0,14 kg; = 3,71 kg:5,58 kg:1,67 L:0,18 kg; = 3,71 kg:5,58 kg:1,67 L:0,22 kg. Conduct flexural tests on standard prismatic concrete specimens and fiber-reinforced concrete specimens with different types and gradients using the "Hydraulic Pressure Testing Machine GB/T3722" tester. The test block is shown in figure 5.

Each layer is compacted using a shaker for 30 seconds. After the casting operation is completed, the samples are demolded for 24 hours and then stored at a temperature of $23,0 \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ and a relative humidity of 95% for 28 days. The process of destruction is shown in figure 6.

2. Results & Discussion



Figure 5. – Flexural test block



Figure 6. – Flexural test

Table 4. – Tensile failure load of the specimen

Serial number	Substitution parameter r, %	Ordinary concrete 28 d, kN	Reed fiber 28 d, kN	Nanofibers 28 d, kN
C1	1	4,1	5,0	4,8
C2	2	3,9	4,9	4,6
C3	3	4,5	5,8	5,2
C4	4	4,2	5,9	4,3
C5	5	4,2	5,4	5,6
C6	6	4,0	4,9	4,7

Table 5. – Compressive failure load of the specimen

Serial number	Substitution parameter r, %	Ordinary concrete 28 d, kN	Reed fiber 28 d, kN	Nanofibers 28 d, kN
C1	1	44,1	44,1	47,4
C2	2	42,3	45,6	46,5
C3	3	42,8	43,8	46,4
C4	4	41,5	50,7	50,1
C5	5	40,2	48,3	43,5
C6	6	42,5	43,9	44,5

2.1 Compressive strength results

2.1.1 Compressive strength of non-metallic nanofiber concrete

In the experiment, we prepared specimens of non-metallic nanofiber concrete and tested their compressive strength. The curve of figure 7 show that the compressive strength of non-metallic nanofiber concrete is approximately 15% higher than that of ordinary concrete. Specifically, the compressive strength of regular concrete is 42,23 kN, while the compressive strength of non-metallic nanofiber concrete reaches approximately 48,4 kN. This result shows that the addition of non-metallic nanofibers effectively improves the compressive strength of concrete. Non-metallic nanofiber concrete has a higher compressive strength, indicating that non-metallic nanofibers have great potential for improving the mechanical properties of concrete. This result provides a theoretical basis and practical guidance for engineering applications, helping to enhance the durability and safety of concrete structures.

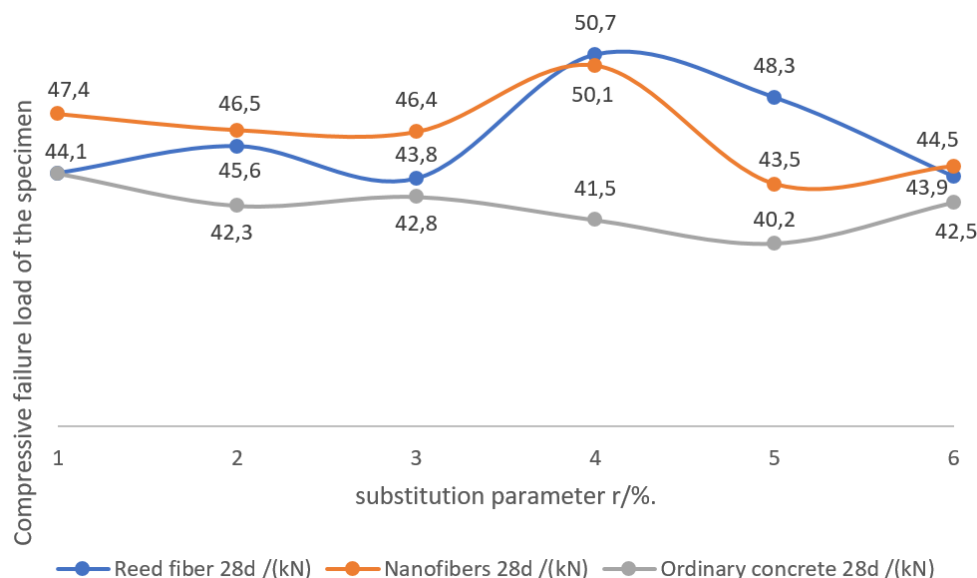


Figure 7. – Compressive failure load of the specimen

2.1.2 Compressive strength of reed fiber reinforced concrete

Through the compressive strength test of specimens made with reed fiber concrete. The results show that the compressive strength of reed fiber concrete is approximately 10% higher than that of ordinary concrete. Specifically, the compressive strength of ordinary concrete is 42,23 kN, while the compressive strength of reed fiber concrete reaches approximately 46,06 kN. This demonstrates that the inclusion of reed fiber effectively enhances the compressive strength of concrete. Reed fiber has excellent mechanical properties and natural weather resistance. Additionally, its chemical properties are highly compatible with cement and other materials used in concrete. These characteristics allow reed fibers to serve as reinforcement in concrete and enhance its compressive strength.

2.2 Tensile strength results

2.2.1 Tensile strength of non-metallic nanofiber reinforced concrete

We conducted tensile tests on specimens of non-metallic nanofiber concrete. Observing figure 8 which show that the tensile strength of non-metallic nanofiber concrete is approximately 25% higher than that of ordinary concrete. The tensile strength of ordinary concrete is 4,15 kN, while the tensile strength of non-metallic nanofiber concrete reaches approximately 5,2 kN. Non-metallic nanofibers possess excellent physical and chemical properties, including a high specific surface area, strong mechanical strength, and chemical stability. Non-metallic nanofibers possess properties that allow them to reinforce concrete and enhance its tensile strength. Therefore, non-metallic nanofibers help to improve the durability and safety of concrete structures.

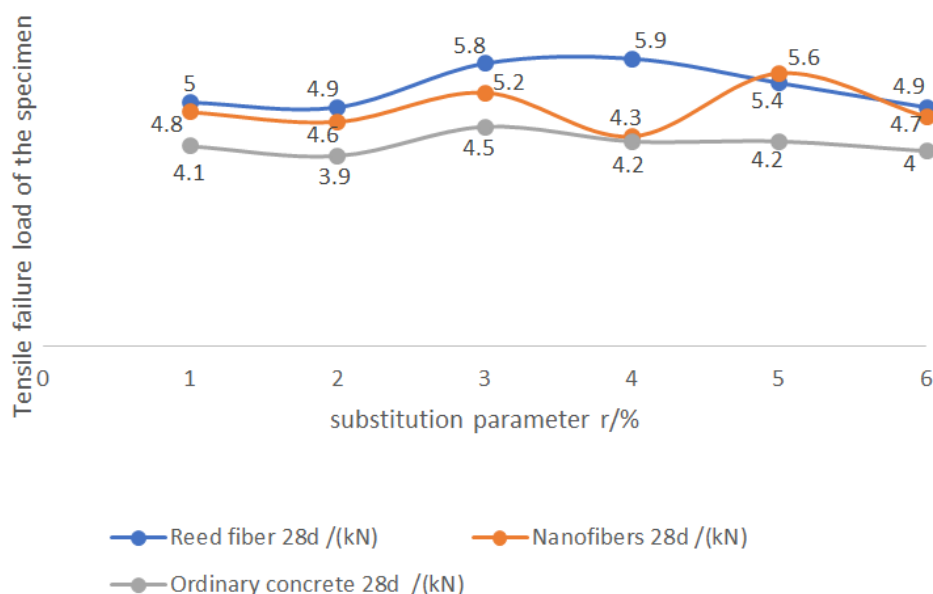


Figure 8. – Tensile failure load of the specimen

2.2.2 Tensile strength of reed fiber reinforced concrete

We prepared specimens of reed fiber concrete and tested their tensile strength. Experimental results show that the tensile strength of reed fiber concrete is approximately 17,5% higher than that of ordinary concrete. The tensile strength of regular concrete is 4,15 kN, whereas the tensile strength of reed fiber concrete reaches approximately 4,85 kN. Reed fiber has excellent mechanical properties and natural weather resistance. Additionally, its chemical properties are highly compatible with cement and other materials used in concrete. These characteristics allow reed fibers to serve as reinforcement in concrete and enhance its tensile strength. In summary, reed fiber concrete also has high tensile strength, indicating that reed fiber has the potential to improve the mechanical properties of concrete. This result provides a theoretical basis and practical guidance for engineering applications, helping to develop new green building materials.

2.3 Durability results

2.3.1 Durability of non-metallic nanofiber concrete

In our study, we compared the durability of non-metallic nanofiber concrete to that of reed fibers in concrete, focusing on their applicability. We conducted a literature review to gather information on the subject. We found that non-metallic nanofiber concrete performs well in terms of durability, thereby enhancing the longevity and safety of concrete structures.

First, we compared the experimental data on dry-wet cycles in the literature. The data showed that non-metallic nanofiber concrete has a strong ability to maintain performance under dry-wet cycles without any noticeable cracks or damage [7]. Second, we compared fatigue test data from the literature. The results show that the fatigue life of non-metallic nanofiber concrete is significantly higher than that of ordinary concrete, indicating that it has better fatigue resistance [8]. In addition, we also compared the data from the carbonization experiment and the sulfate attack experiment. The data results show that non-metallic nanofiber concrete has a strong ability to maintain performance under these environmental factors and has obvious advantages compared to ordinary concrete [9].

2.3.2 Durability of reed fiber reinforced concrete

First, we compared the experimental data on dry-wet cycles in the literature. The data showed that reed fiber concrete has a strong ability to maintain performance under dry-wet cycles without any noticeable cracks or damage [6]. Second, we compared the fatigue test data. The results show that the fatigue life of reed fiber concrete is slightly higher than that of ordinary concrete, indicating that it has better fatigue resistance. In addition, we compared experimental data on carbonization and sulfate attack to evaluate the durability of concrete under specific environmental conditions [10]. The data shows that reinforced fiber concrete has a strong ability to maintain performance under these environmental factors and has certain advantages over regular concrete. To sum up, reinforced fiber concrete also demonstrates good durability and has potential for various applications. This result provides a theoretical basis and practical guidance for engineering applications, helping to develop new green building materials [11].

2.4 SEM electron microscopy image analysis



Figure 9. – SEM without fiber added

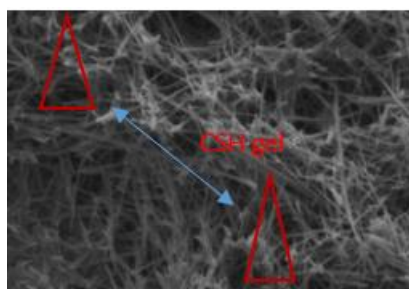


Figure 10. – SEM of nanofiber added

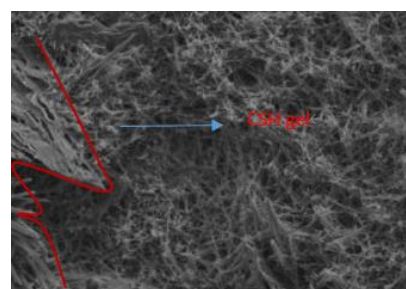


Figure 11. – SEM of reed fiber

Figure 9 shows the microscopic morphology of concrete without fiber. In the figure, needle like ettringite crystals and some lamellar CSH gel can be clearly seen. As can be seen from figure 10, when nanofiber is added, the SEM microstructure of concrete has changed significantly compared with ordinary concrete. The ettringite formed by cement hydration becomes fine and dense, and ettringite crystals are bound together by many films, Create smaller gaps and tighter distribution between structures. In addition, the performance of reed fibers in concrete is more prominent, as they have a tighter structural arrangement, as shown in figure 11.

3. Comparison of material properties

3.1 Performance characteristics of non-metallic nanofibers

Firstly, non-metallic nanofibers offer several advantages such as a high specific surface area and strength, which can effectively enhance the mechanical properties of concrete. Adding non-metallic nanofibers to concrete can significantly enhance its tensile strength, compressive strength, and crack resistance. Secondly, it also has good heat insulation and thermal insulation properties, which can effectively enhance the thermal insulation effect of concrete. In cold areas or buildings that require insulation, the utilization of concrete containing non-metallic nanofibers can decrease energy consumption and enhance the energy efficiency of buildings. Finally, it also exhibits good physical stability and can effectively withstand

the influence of environmental factors, such as fire resistance, impact resistance, and wear resistance, among other performance characteristics [12]. Therefore, the use of non-metallic nanofibers can enhance the durability of concrete and prolong its lifespan. Non-metallic nanofibers, however, are a type of fibers that are synthetically extracted. The production process is relatively complicated, and the cost is too high, so they cannot be applied to a large number of projects.

3.2 Performance characteristics of reed fiber

Reed fiber is a natural, renewable resource and has more environmentally friendly advantages than traditional concrete. It also has good thermal insulation, sound insulation, and other performance characteristics, which can play an important role in concrete. Specifically, it has high strength and stiffness, which can effectively enhance the mechanical properties of concrete. It also exhibits good chemical stability and can effectively resist the influence of environmental factors, such as oxidation and corrosion [5]. Therefore, adding reed fiber to concrete can significantly improve its tensile strength, compressive strength, and crack resistance.

3.3 Comparative analysis of material properties

Both fibers can enhance the mechanical properties of concrete, but non-metallic reed fibers have a more pronounced reinforcing effect on concrete. This is because non-metallic reed fibers have a higher specific surface area and strength, allowing them to be more effectively dispersed in concrete. As a result, they enhance the tensile strength, compressive strength, and crack resistance of the concrete. Although both non-metallic nanofibers and reed fibers can improve the durability of concrete. Non-metallic nanofibers, however, exhibit superior chemical stability and are more resistant to environmental factors such as oxidation and corrosion. Therefore, non-metallic nanofibers may be more suitable for applications that require long-term durability. Reed fiber is a natural, renewable resource with environmental advantages. However, non-metallic nanofibers are also environmentally friendly materials that can be made from renewable resources and have a lower environmental impact throughout their life cycle. Therefore, both fibers have their advantages in terms of environmental protection. Both fibers have performance characteristics such as heat insulation, thermal insulation, and sound insulation, and can play an important role in concrete. In addition, non-metallic nanofibers also offer the advantages of a high modulus and low density, which can enhance the lightweight and high-strength characteristics of concrete. Therefore, both non-metallic nanofibers and reed fibers can play a role in reinforcing concrete, improving durability, and enhancing environmental protection. However, there are some differences between them, and the choice needs to be based on specific application needs.

Conclusion. First of all, it is worth confirming that both non-metallic nanofibers and reed fibers can enhance the mechanical properties of concrete. The compressive strengths of non-metallic nanofiber concrete and reed fiber concrete are respectively 6,17 kN and 3,83 kN higher than ordinary concrete, which is an increase of about 15% and 10%. The tensile strength of non-metallic nanofiber concrete and reed fiber concrete are respectively increased by 1,05 kN and 0,7 kN, which is about 25% and 17,5% higher compared to ordinary concrete. This indicates that the reinforcing effect of non-metallic nanofibers is more significant. In addition, an analysis of the microstructure of non-metallic nanofibers and reed fiber concrete under a scanning electron microscope (SEM) reveals that the flexural density of metal nanofiber concrete and reed fiber concrete is higher. This significantly enhances the compactness of the internal structure. Furthermore, the addition of reed fiber results in a denser ettringite structure compared to nanofiber. This indicates that the inclusion of reed fiber leads to improved distribution and workability of the internal structure.

Not only can they improve the durability of concrete, but non-metallic nanofibers also exhibit better chemical stability and resistance to environmental factors. But reed fiber is a natural, renewable resource with environmentally friendly advantages. Additionally, non-metallic nanofiber is also an environmentally friendly material that can be derived from renewable resources and has a lower environmental impact throughout its life cycle. Therefore, non-metallic nanofibers and reed fibers have the advantages of high modulus and low density, which can enhance the lightweight and high-strength characteristics of concrete.

Therefore, we can leverage the performance characteristics of non-metallic nanofibers and reed fibers to enhance the durability and environmental sustainability of concrete. However, there are some differences between them, and the choice needs to be based on specific application needs. In applications that require higher reinforcement and durability, non-metallic nanofibers may be more suitable. On the other hand, in applications that prioritize the utilization of natural renewable resources and environmental friendliness, reed fibers may be more suitable.

REFERENCES

1. Konsta-Gdoutos, M.S., Metaxa, Z.S. & Shah, S.P. (2010). Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. *Cem. Concr. Res.*, 40(7), 1052–1059. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.015.
2. Lawrence, J.G., Berhan, L.M. & Nadarajah, A. (2008). Elastic properties and morphology of individual carbon nanofibers. *ACS Nano*, 2(6), 1230–1236. DOI: 10.1021/nn7004427.
3. Mordlkovich, V.Z. (2003). Carbon nanofibers: A new ultrahigh-strength material for chemical technology. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 37(5), 429–438. DOI: 10.1023/A:1026082323244.
4. Machaka, M., Khatib, J., Baydoun, S., Elkordi, A. & Assaad, J.J. (2022). The Effect of Adding Phragmites australis Fibers on the Properties of Concrete. *Buildings*, 12(3), 278. DOI: 10.3390/buildings12030278.
5. Cardinale, T., Arleo, G., Bernardo, F., Feo, A. & De Fazio, P. (2017). Investigations on thermal and mechanical properties of cement mortar with reed and straw fibers. *International Journal of Heat and Technology*, 35(1), 375–382. DOI: 10.18280/ijht.35Sp0151.
6. Shon, C.-S., Mukashev, T., Lee, D., Zhang, D. & Kim, J.R. (2019). Can common reed fiber become an effective construction material? Physical, mechanical, and thermal properties of mortar mixture containing common reed fiber. *Sustainability*, 11(3), 903. DOI: 10.3390/su11030903.

7. Polonina, E.N., Leonovich, S.N., Khroustalev, B.M., Sadovskaya, E.A. & Budrevich, N.A. (2021). Cement-based materials modified with nanoscale additives. *Science and Technique*, 20(3), 189–194. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194.
8. Wang, Y., Zhang, L. & Sun, B. (2020). The use of non-metallic nanofibers in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 237, 117593.
9. Xu, M., Li, Q. & Ma, L. (2021). Performance and Durability of Nanofiber-Reinforced Concrete: A Review and Future Perspective. *Construction and Building Materials*, 271, 122691.
10. Nahhab, A.H. (2009). Some Mechanical Properties of Concrete Reinforced with Reed Fibers. *Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences*, 2(1), 31–37.
11. Van, S., Leonovich, S., Vei, M. & Kovshar, S. (2023). Konstruktsionnyi beton, armirovannyi trostnikovym i kokosovym vidami volokon. *Arkhitectura i stroitel'stvo [Architecture and Construction]*, (3), 20–28. (In Russ., abstr. in Engl.). URL: https://smp.by/wp-content/uploads/2023/08/ais_03_2023-20-28.pdf.
12. Wang, T., Xu, J., Meng, B. & Peng, G. (2020). Experimental study on the effect of carbon nanofiber content on the durability of concrete. *Construction and building materials*, 250(3), 118891. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118891.
13. Sadovskaya, E.A., Leonovich, S.N., Zhdanok, S.A. & Polonina, E.N. (2020). Prochnost' nanofibrobetona na rastyazhenie. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal [J. of Engineering Physics and Thermophysics]*, 93(4), 1051–1055. (In Russ.).

Поступила 08.12.2023

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОВОЛОКОН И ТРОСТНИКОВЫХ ВОЛОКОН В БЕТОНЕ

С. ВАН¹⁾, Х. ЮЙ²⁾, Е.А. САДОВСКАЯ³⁾, канд. техн. наук, доц. С.Н. КОВШАР⁴⁾,
д-р техн. наук, проф. С.Н. ЛЕОНОВИЧ⁵⁾
(¹⁾⁻⁵⁾ Белорусский национальный технический университет, Минск)

В данной статье в основном проводятся механические и механохимические эксперименты по изучению неметаллического нановолокнистого бетона и неметаллического бетона из тростникового волокна. На основе соответствующих механических экспериментальных данных подробно сравниваются механические свойства этих двух волокон и определяются их структуры в бетоне. Долговечность, экологическая безопасность, химическая стабильность и физико-механические свойства позволяют надеяться, что они послужат основой для разработки бетонных материалов на основе неметаллических волокон.

Ключевые слова: неметаллическое волокно, нановолокно, тростниковое волокно, бетон.

УДК 624.012.45

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-21-27

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ КОМПОЗИТНЫМ МАТЕРИАЛОМ

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. Е.Н. БАДАЛОВА
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Представлены результаты применения деформационной и блочной моделей для определения параметров напряженно-деформированного состояния, расчета прочности, ширины раскрытия трещин и прогибов предварительно напряженных изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в растянутой зоне пластинами из углеродных волокон, приклеенными к наружной поверхности бетона и вклеенными в предварительно выполненные вертикальные пазы. При расчете параметров напряженно-деформированного состояния усиленных элементов учтено распределение относительных деформаций и напряжений в поперечном сечении элемента до усиления, включая влияние усилия обжатия, передаваемого на бетон предварительно напряженной основной арматурой. Приведено распределение относительных деформаций и напряжений в поперечном сечении опытных образцов на основных этапах, соответствующих различным стадиям нагружения. Проведена экспериментальная верификация предложенной методики для расчета прочности, ширины раскрытия трещин и прогибов предварительно напряженных изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитным материалом.

Ключевые слова: деформационная расчетная модель, блочная модель, напряженно-деформированное состояние, предварительно напряженный железобетонный элемент, дополнительная арматура, пластина из углеродных волокон.

Введение. Деформационная расчетная модель сопротивления для расчета железобетонных конструкций, позволяющая получить параметры их напряженно-деформированного состояния на любом этапе работы под нагрузкой, нашла практическое применение благодаря началу широкого использования компьютерной техники, осуществляющей итерационные процессы решения системы уравнений деформационного метода в течение короткого времени. При этом начали разрабатываться методы расчета на основе деформационной модели с использованием диаграмм деформирования материалов и для усиленных железобетонных конструкций¹ [1; 2]. Действующие нормативные документы по проектированию усиления железобетонных конструкций композиционными материалами на основе углеродных волокон также рекомендуют деформационную модель для расчета прочности усиленных элементов².

Деформационная модель позволяет определять параметры напряженно-деформированного состояния конструкции в любом поперечном сечении по ее длине и любой его конфигурации, используя в т.ч. нелинейные диаграммы деформирования бетона и арматуры. Преимущество применения деформационной модели для расчета усиленных конструкций заключается в возможности учета напряженно-деформированного состояния конструкции до ее усиления, что не позволяют осуществить другие методы.

Целью настоящего исследования является экспериментальная верификация деформационной и блочной моделей для расчета прочности, ширины раскрытия трещин и прогибов предварительно напряженных железобетонных изгибаемых элементов, усиленных в растянутой зоне дополнительной арматурой из композитного материала (пластинами из углеродных волокон), с учетом влияния напряженно-деформированного состояния элемента при отпуске предварительно напряженной основной арматуры на распределение относительных напряжений и деформаций в поперечном сечении элемента после усиления. Рассмотрены элементы, усиленные приклеиванием пластин к наружной поверхности бетона и вклеиванием в предварительно выполненные вертикальные пазы.

Методика экспериментального исследования. Опытными образцами для экспериментальных исследований являлись железобетонные многослойные плиты поперечным сечением 720×220 мм, которые испытывали по однопролетной балочной схеме с расчетным пролетом 5840 мм. При испытании нагружали верхнюю грань плит четырьмя сосредоточенными силами, моделируя равномерно распределенную нагрузку. Основное армирование растянутой (нижней) зоны плит выполнялось двумя предварительно напряженными арматурными стержнями диаметром 12 мм класса S800. Дополнительное армирование растянутой зоны плит осуществляли пластинами из углеродных волокон с $f_{k,ad}=2465$ МПа, $E_{s,ad}=191000$ МПа. Плиту П-4 усиливали приклеиванием двух пластин поперечным сечением 50×1,2 мм к бетону наружной грани, плиту П-6 – вклеиванием двух пластин поперечным сечением 25×1,2 мм в предварительно выполненные вертикальные пазы³.

¹ Кремнева Е.Г. Прочность нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных намоноличиванием под нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – М., 1996. – 162 л.

Усиление железобетонных конструкций: Пособие П1-98 к СНиП 2.03.01-84*. – Введ. 01.05.1998. – Минск: Минстрой-архитектуры Респ. Беларусь, 1998. – 189 с.

Жукьян А.П. Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных плит перекрытий, усиленных созданием неразрезности: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Новополоцк, 2003. – 112 л.

² СТО 38276489.001-2017 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Проектирование и технология производства работ. – М.: ООО «НЦК», 2017. – 125 с.

Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures / Reported by ACI Committee 440: ACI 440.2R-17, 2017. – 110 p. URL: https://afzir.com/knowledge/wp-content/uploads/2018/03/ACI_440_2R_17_Guide_for_the_Design.pdf.

FRP reinforcement in RC structures: Fib Bulletin 40. Technical report. – Switzerland, 2007. – 147 p. URL: <http://compositelibrary.com/pdf/40%20-%20FRP%20reinforcement%20in%20RC%20structures.pdf>.

³ Бадалова Е.Н. Усиление железобетонных многослойных плит перекрытий приклеиванием арматуры из углеродных волокон: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Новополоцк, 2013. – 140 л.

В результате экспериментальных исследований были установлены значения изгибающих моментов, соответствующих моменту разрушения конструкции: для плиты П-4 $M_u=67,7$ кН·м; для плиты П-6 $M_u=72,9$ кН·м. Разрушение опытной плиты П-4 определилось разрушением контактного соединения дополнительной арматуры с бетоном. При этом относительные продольные деформации дополнительной арматуры составили 5,5‰, что меньше их предельного значения. При разрушении опытной плиты П-6 установлен разрыв пластины из углеродных волокон, что соответствует предельному значению относительных продольных деформаций дополнительной арматуры 12,9‰ и напряжению 2465 МПа.

Расчетная модель. Для установления значений деформаций и напряжений в бетоне, основной и дополнительной арматуре усиленных предварительно напряженных изгибаемых железобетонных элементов на любых этапах нагружения применяли деформационную модель. Согласно деформационной модели поперечное сечение опытных образцов моделировали совокупностью элементарных площадок.

Основными рассматриваемыми этапами, соответствующими различным стадиям нагружения конструкции, являются: стадия отпуска предварительно напряженной основной арматуры с передачей усилия предварительного напряжения на бетон конструкции; стадия эксплуатации, предшествующая усилению конструкции, учитывающая деформации в основном сечении от внешних воздействий, включая нагрузку от собственного веса конструкции и усилие обжатия; стадия эксплуатации конструкции после усиления под влиянием внешних воздействий вплоть до ее предельного состояния.

Для первого этапа характерно наличие относительных деформаций и напряжений сжатия в бетоне нижней зоны плиты, в которой при последующих нагружениях возникает растяжение (рисунок 1). При отпуске предварительно напряженной основной арматуры в бетоне верхней зоны плиты появились относительные деформации и напряжения растяжения, которые не превысили значений, соответствующих образованию трещин.

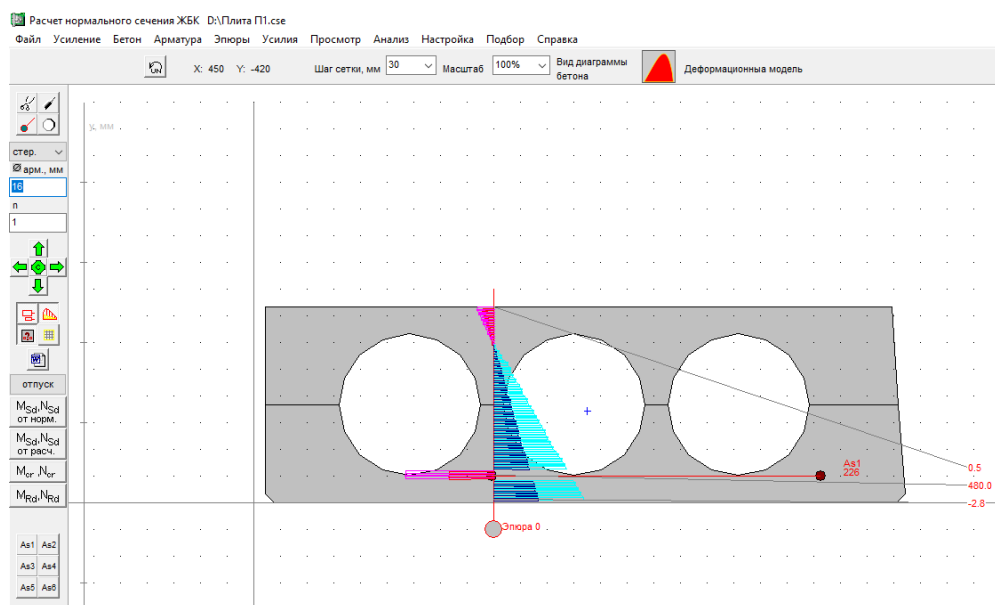


Рисунок 1. – Моделирование напряженно-деформированного состояния опытной плиты на стадии отпуска предварительно напряженной арматуры

Для стадии отпуска предварительно напряженной основной арматуры напряженно-деформированное состояние конструкции описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} \cdot (y_0 - y_i) + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} \cdot (y_0 - y_j) = 0 \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} = 0 \\ \varepsilon_{0ci} = \frac{1}{r} (y_0 - y_i), \quad \varepsilon_{0pj} = \frac{1}{r} (y_0 - y_j) \\ \sigma_{ci} = f(\varepsilon_{0ci}), \quad \sigma_{pj} = f(\varepsilon_{0pj}) \end{cases}, \quad (1)$$

где A_{ci} , σ_{ci} , ε_{0ci} и A_{pj} , σ_{pj} , ε_{0pj} – площадь сечения, нормальные напряжения, продольные относительные деформации элементарной площадки соответственно бетона и предварительно напряженной основной арматуры;

y_0 – координата центра тяжести сечения конструкции в момент обжатия;

y_i и y_j – координата центра тяжести элементарной площадки соответственно бетона и основной арматуры;

$\frac{1}{r}$ – кривизна продольной оси конструкции в рассматриваемом поперечном сечении в момент обжатия.

Для стадии эксплуатации конструкции до усиления относительные деформации и напряжения в бетоне и основной арматуре опытной плиты определяли с учетом нагрузки от собственного веса конструкции и усилия обжатия из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} \cdot (y_{0,1} - y_i) + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} \cdot (y_{0,1} - y_j) - M_1 = 0 \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} = 0 \\ \varepsilon_{1ci} = \frac{1}{r_1} (y_{0,1} - y_i) + \varepsilon_{0ci}, \quad \varepsilon_{1pj} = \frac{1}{r_1} (y_{0,1} - y_j) + \varepsilon_{0pj} \\ \sigma_{ci} = f(\varepsilon_{1ci}), \quad \sigma_{pj} = f(\varepsilon_{1pj}) \end{cases}, \quad (2)$$

где $y_{0,1}$ – координата центра тяжести сечения конструкции перед усилением;

M_1 – изгибающий момент от внешних воздействий перед усилением конструкции;

$\frac{1}{r_1}$ – кривизна продольной оси конструкции в рассматриваемом поперечном сечении перед усилением.

Работа конструкции на втором этапе характеризовалась упругими относительными деформациями и соответствующими им напряжениями в бетоне и основной арматуре (рисунок 2). Образования трещин в бетоне растянутой зоны конструкций не происходило. Определенные на втором этапе относительные деформации и напряжения учитывались при расчете параметров напряженно-деформированного состояния усиленной конструкции.

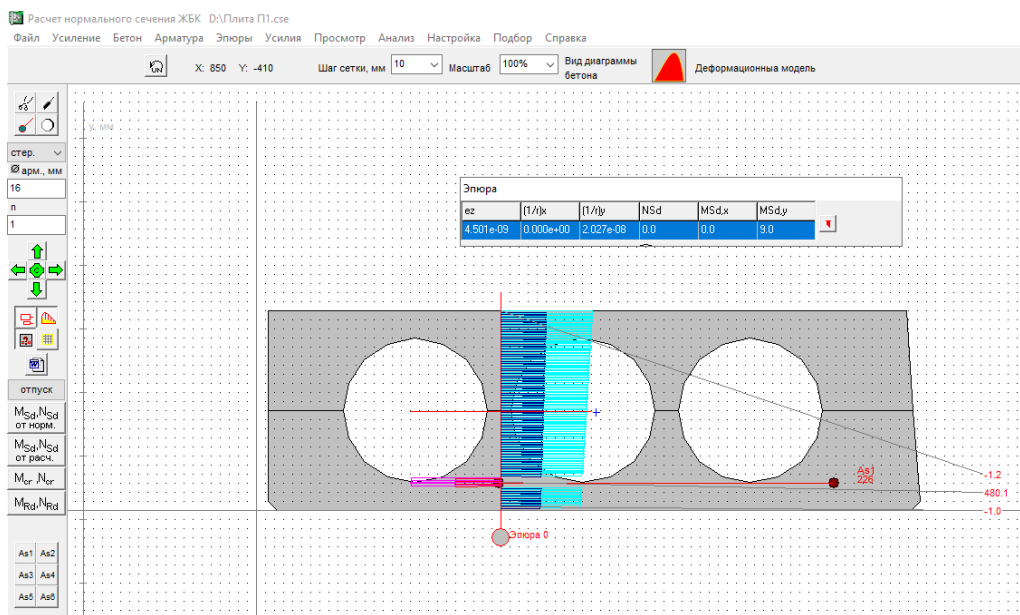


Рисунок 2. – Моделирование напряженно-деформированного состояния опытной плиты на стадии эксплуатации, предшествующей усилению

На третьем этапе определяли относительные деформации и напряжения в бетоне, основной арматуре и дополнительной арматуре усиления плиты при ее работе под влиянием внешних воздействий исходя из решения системы уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} \cdot (y_{0,ad} - y_i) + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} \cdot (y_{0,ad} - y_j) + \\ \quad + \sum_{k=1}^t \sigma_{s,adk} \cdot A_{s,adk} \cdot (y_{0,ad} - y_k) - M = 0 \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} + \sum_{k=1}^t \sigma_{s,adk} \cdot A_{s,adk} = 0 \\ \varepsilon_{ci} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{0,ad} - y_i) + \varepsilon_{0ci} + \varepsilon_{1ci} \\ \varepsilon_{pj} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{0,ad} - y_j) + \varepsilon_{0pj} + \varepsilon_{1pj} \\ \varepsilon_{s,adk} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{0,ad} - y_k) \\ \sigma_{ci} = f(\varepsilon_{ci}), \quad \sigma_{pj} = f(\varepsilon_{pj}), \quad \sigma_{s,adk} = f(\varepsilon_{s,adk}) \end{cases}, \quad (3)$$

где $A_{s,adk}$, $\sigma_{s,adk}$, $\varepsilon_{s,adk}$ – площадь сечения, нормальные напряжения, продольные относительные деформации элементарной площадки дополнительной арматуры из углеродных волокон;

$y_{0,ad}$ – координата центра тяжести сечения усиленной конструкции;

y_k – координата центра тяжести элементарной площадки дополнительной арматуры из углеродных волокон;

M – изгибающий момент от внешних воздействий после усиления;

$\frac{1}{r_{ad}}$ – кривизна продольной оси усиленной конструкции в рассматриваемом поперечном сечении от нагрузки, приложенной после усиления.

В расчете принималась диаграмма деформирования бетона при осевом кратковременном сжатии криволинейного очертания с ниспадающей ветвью⁴, описанная уравнением:

⁴ СП 5.03.01 Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2022. – 236 с.

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k_c \eta_c - \eta_c^2}{1 + (k_c - 2) \eta_c} \quad (4)$$

Диаграмму деформирования для основной предварительно напряженной арматуры принимали идеализированной двухлинейной согласно СП 5.03.01⁵, для дополнительной арматуры – линейную зависимость «напряжение – относительная деформация», полученную по результатам испытаний на растяжение пластин из углеродных волокон⁶ [3]. При этом для конструкций, усиленных приклеиванием к наружной поверхности бетона пластин из углеродных волокон, наступление предельного состояния в результате разрушения контактного соединения дополнительной арматуры с бетоном учитывается ограничением относительных деформаций дополнительной арматуры⁷.

На третьем этапе рассматривается стадия эксплуатации конструкции до образования трещин в бетоне с прямолинейной эпюрой распределения напряжений по высоте поперечного сечения и стадия эксплуатации конструкции с трещинами в бетоне растянутой зоны. Значения относительных деформаций и напряжений в бетоне и арматуре на участке между трещинами определяли решением системы уравнений блочной модели [4]

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} S_{s,red} = \varepsilon_{s,red}(\sigma_p, \sigma_{s,ad}) - \varepsilon_{ct} \left(\frac{N - \sigma_p A_p - \sigma_{s,ad} A_{s,ad}}{A_{c,eff}} \right) \\ \frac{d}{dx} \sigma_p = \frac{4}{\phi} \cdot \tau_b(s_b) \\ \frac{d}{dx} \sigma_{s,ad} = \frac{A_{s,ad} \tau_{ad}(s_{ad})}{u_{s,ad}} \end{cases}, \quad (5)$$

где N – суммарное усилие в растянутом бетоне, основной и дополнительной арматуре;

τ_b, τ_{ad} – касательные напряжения по контакту соответственно основной предварительно напряженной и дополнительной композитной арматуры с бетоном.

Закон сцепления основной предварительно напряженной арматуры с бетоном $\tau_b = f(s_b)$ принимали в соответствии с СП 5.03.01⁸, дополнительной арматуры из углеродных волокон – в соответствии с данными⁹ и [1].

При разбиении поперечного сечения усиленной многопустотной плиты на элементарные площадки дополнительную арматуру в виде пластины из углеродных волокон, приклеенную к наружной грани конструкции, ввиду ее малой толщины моделируем одной элементарной площадкой (рисунок 3). Дополнительную арматуру в виде пластины из углеродных волокон, вклеенной в предварительно выполненный вертикальный паз, разбиваем по высоте на ряд элементарных площадок, что позволяет учесть работу на изгиб арматуры из углеродных волокон, расположенной вертикально (рисунки 4, 5).

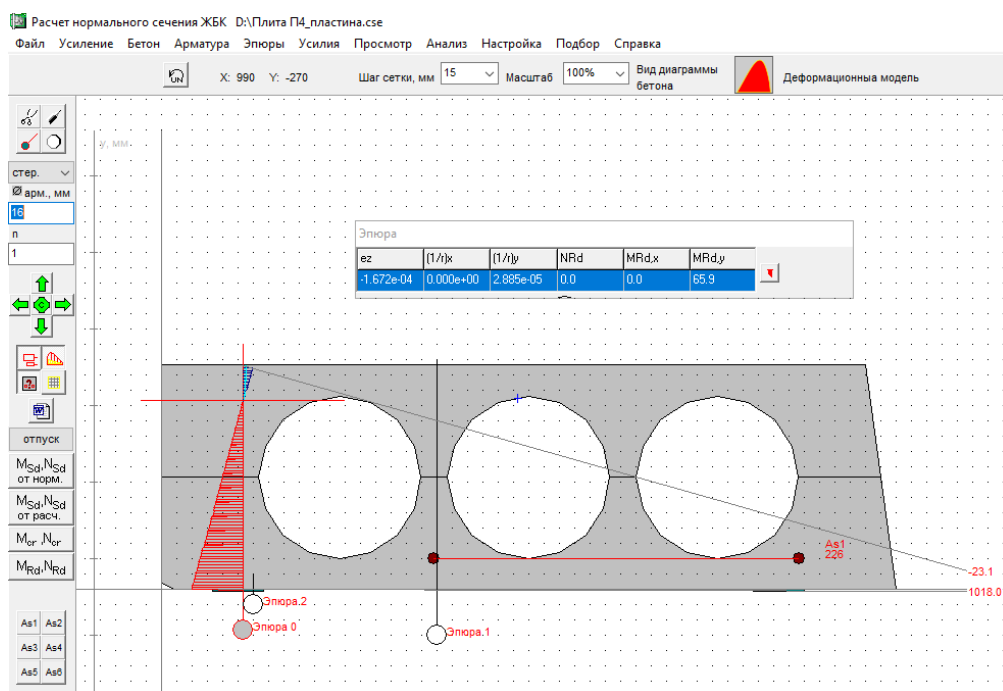


Рисунок 3. – Моделирование напряженно-деформированного состояния опытной плиты, усиленной приклеиванием к наружной поверхности бетона пластин из углеродных волокон

⁵ См. сноску 4.

⁶ См. сноску 3.

⁷ См. сноску 3.

⁸ См. сноску 4.

⁹ См. сноску 3.

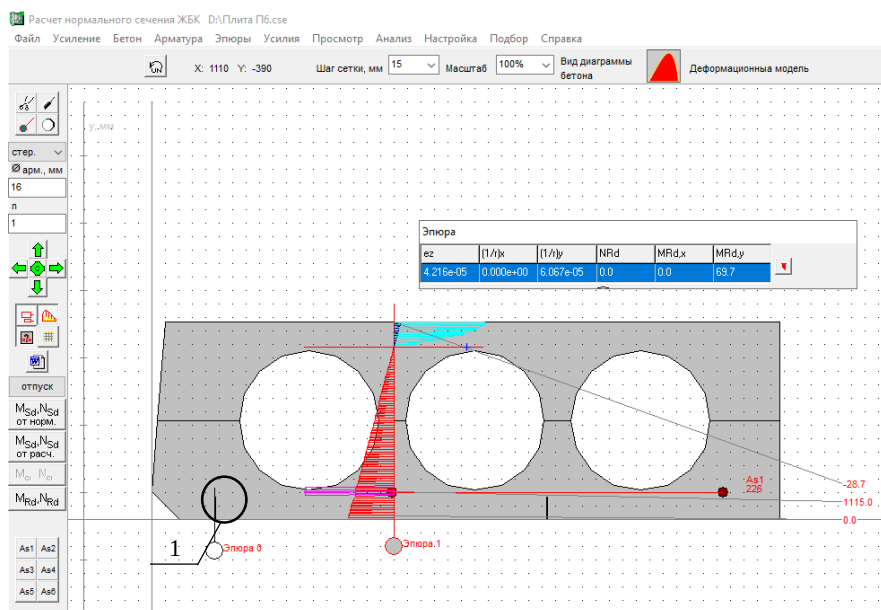


Рисунок 4. – Моделирование напряженно-деформированного состояния опытной плиты, усиленной клееванием в предварительно выполненные вертикальные пазы пластин из углеродных волокон

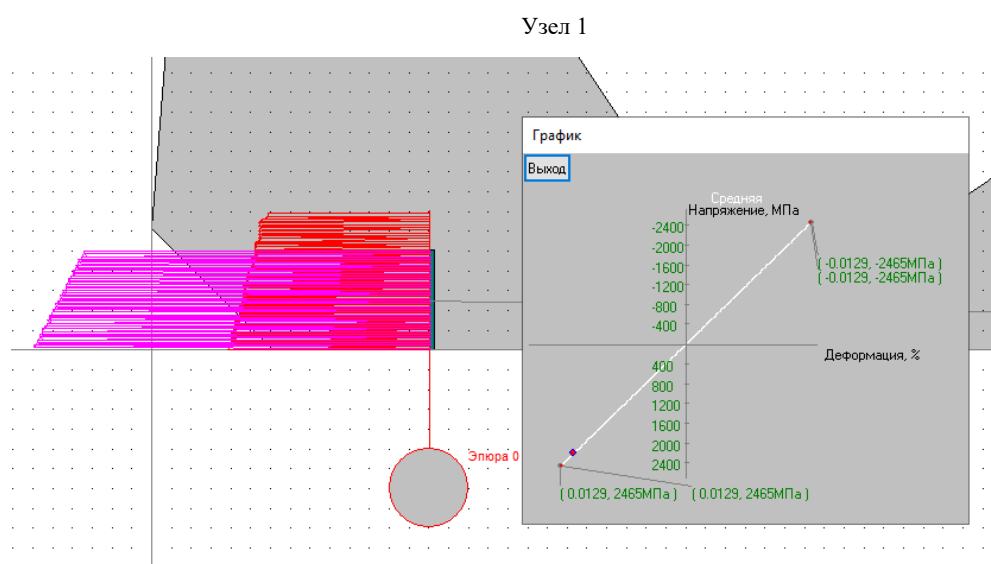


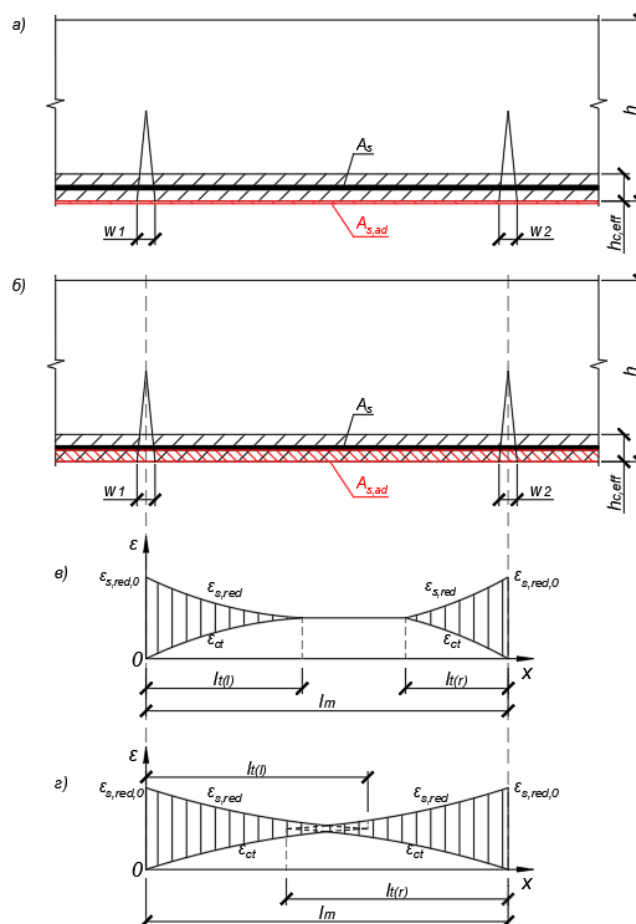
Рисунок 5. – Моделирование напряженно-деформированного состояния пластины из углеродных волокон, вклеенной в предварительно выполненный вертикальный паз в бетоне растянутой зоны усиливаемой плиты

Ширину раскрытия трещин, нормальных к продольной оси железобетонного элемента, усиленного дополнительной арматурой из углеродных волокон, определяли как сумму взаимных смещений приведенной арматуры и бетона на уровне центра тяжести основной арматуры по длине зон сдвигов слева $l_{(l)}$ и справа $l_{(r)}$ от трещины (рисунок 6) аналогично [4]

$$w = \int_{-l_{(l)}}^{l_{(r)}} s(x) dx = \int_{-l_{(l)}}^{l_{(r)}} [\varepsilon_{s,red}(x) - \varepsilon_{ct}(x)] dx. \quad (6)$$

Для определения прогибов жесткость изгибаемого железобетонного элемента, усиленного дополнительной арматурой из углеродных волокон, на участке с трещинами вычисляли с учетом работы растянутого бетона как среднее значение суммы жесткостей элементарных площадок бетона, основной и дополнительной арматуры по границам участка

$$(EI)_i = \left[\left[E_{c,p} \cdot A_{c,p} (y_{c,p} - y_{0,ad})^2 \right]_i + \left[E_{s,ad} \cdot A_{s,ad} (y_{s,ad} - y_{0,ad})^2 \right]_i + \left[E_{c,p} \cdot A_{c,p} (y_{c,p} - y_{0,ad})^2 \right]_{i+1} + \left[E_{s,ad} \cdot A_{s,ad} (y_{s,ad} - y_{0,ad})^2 \right]_{i+1} \right] / 2. \quad (7)$$



а – приклеенным к наружной поверхности бетона; **б** – вклеенным в предварительно выполненные вертикальные пазы; **в** – на первой стадии трещинообразования; **г** – на второй стадии трещинообразования

Рисунок 6. – Распределение относительных деформаций бетона и арматуры по длине железобетонного блока изгибаемого элемента, усиленного композитным материалом

Анализ результатов экспериментально-теоретического исследования. При сравнении экспериментальных значений изгибающего момента, соответствующего моменту разрушения конструкции, ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента, и прогиба при изгибающем моменте от эксплуатационной нагрузки с расчетными значениями, определенными по деформационной и блочной моделям, для плит, усиленных пластинами из углеродных волокон, приклеенными к наружной поверхности бетона и вклеенными в предварительно выполненные вертикальные пазы, получена удовлетворительная сходимость (таблица 1).

Таблица 1. – Сопоставление экспериментальных и расчетных значений изгибающего момента, соответствующего прочности опытных плит, ширины раскрытия трещин и прогиба

Шифр опытной плиты	M_{exp} , кНм	M_{calc} , кНм	$\frac{M_{exp}}{M_{calc}}$	w_{exp} , мм	w_{calc} , мм	$\frac{w_{exp}}{w_{calc}}$	a_{exp} , мм	a_{calc} , мм	$\frac{a_{exp}}{a_{calc}}$
П-4	67,7	65,9	1,03	0,325	0,287	1,13	32,5	30,9	1,05
П-6	72,9	69,7	1,05	0,523	0,539	0,97	77,0	77,2	1,00

Заключение. Предложена обобщенная методика расчета основных параметров напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в растянутой зоне дополнительной арматурой из углеродных волокон, позволяющая учесть относительные деформации и напряжения в поперечном сечении элемента до усиления, включая нагрузку от обжатия, передаваемого на бетон предварительно напряженной основной арматурой.

Произведена экспериментальная верификация предложенной методики для расчета прочности, ширины раскрытия трещин и прогибов предварительно напряженных изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитным материалом на основе углеродных волокон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холмянский М.М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность. – М.: Стройиздат, 1997. – 576 с.
2. Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 1998. – 240 с.
3. Щербо А.Г., Лазовский А.Д. Усиление изгибаемых стальных и сталебетонных строительных конструкций композиционными материалами // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2008. – № 12. – С. 70–80.
4. Моделирование напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в растянутой зоне внешним армированием композитными материалами под нагрузкой / Д.Н. Лазовский, С.Н. Леонович, Д.О. Глухов и др. // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. – 2023. – № 2(131). – С. 9–19.

REFERENCES

1. Kholmyanskii, M.M. (1997). *Beton i zhelezobeton. Deformativnost' i prochnost'*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
2. Lazovskii, D.N. (1998). *Usilenie zhelezobetonnykh konstruksii ekspluatiruemykh stroitel'nykh sooruzhenii*. Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ.).
3. Shcherbo, A.G. & Lazovskii, A.D. (2008). Usilenie izgibaemykh stal'nykh i stalebetonnykh stroitel'nykh konstruksii kompozitsionnymi materialami. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki*, (12), 70–80. (In Russ.).
4. Lazovskii, D.N., Leonovich, S.N., Glukhov, D.O., Lazovskii, E.D. (2023). Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh v rastyanutoi zone vneshnim armirovaniem kompozitnymi materialami pod nagruzkoi [Modeling of the stress-strain state of bending reinforced concrete elements reinforced in a tensioned zone by external reinforcement with composite materials under load]. *Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta [Vestnik of Brest State Technical University]*, 2(131), 9–19. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-9-19.

Поступила 08.12.2023

**MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF PRESTRESSED REINFORCED
CONCRETE ELEMENTS REINFORCED WITH COMPOSITE MATERIAL**

D. LAZOVSKI, E. BADALOVA
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The results of applying a deformation and block models to determine the parameters of the stress-strain state and calculate the strength of prestressed bent reinforced concrete elements reinforced in a stretched zone with carbon fiber plates glued to the outer surface of concrete and glued into pre-made vertical grooves are presented. When calculating the parameters of the stress-strain state of reinforced elements, the distribution of relative deformations and stresses in the cross section of the element before reinforcement is taken into account, including the effect of the compression force transmitted to the concrete by the prestressed main reinforcement. The distribution of relative deformations and stresses in the cross section of the prototypes at the main stages corresponding to different loading stages is given. The verification of the proposed methodology for calculating the strength of prestressed bent reinforced concrete elements reinforced with composite material has been carried out.

Keywords: *deformation calculation model, block model, stress-strain state, prestressed reinforced concrete element, additional reinforcement, carbon fiber plate.*

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ

д-р архитектуры, проф. Е.Б. МОРОЗОВА
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2545-4792>

В статье рассматривается экологический подход в промышленном проектировании. Анализируются технологические, технические и архитектурно-планировочные природоохранные средства, их развитие и совершенствование, возможности и перспективы в условиях Республики Беларусь.

Ключевые слова: промышленная архитектура, природоохранные средства, экологический подход, промышленное проектирование, охрана окружающей среды.

Введение. Среди всех объектов архитектуры промышленные предприятия являются наиболее экологически опасными. Это утверждение никогда не подвергалось сомнению, причем не только на уровне бытового сознания, но и на уровне профессиональной деятельности. Негативное воздействие на окружающую среду заводских и фабричных построек было всегда очевидным и делало их крайне нежелательными в поселении. Так, еще в XIX в. английский теоретик искусства В. Моррис в своем философско-утопическом романе «Вести ниоткуда, или Эпоха спокойствия» изобразил Лондон XXI в. без фабрик [1].

Однако далеко не все в промышленной архитектуре сегодня так однозначно. Во-первых, не все предприятия действительно опасны с точки зрения вредных выбросов, современные тенденции развития этого вида зодчества свидетельствуют о стирании в ряде случаев граней между гражданской и промышленной средой. Во-вторых, в наших городах и поселениях размещается более 80% всех производственных объектов, и мы уживаемся с ними, при этом порой достаточно неплохо. Ну и, в-третьих, как-то уходит на второй план то, что современный уровень технологического развития общества предполагает не только воздействие производства на человека, но и обратный процесс, когда промышленное предприятие выступает сверхчистым, испытывающим негативное влияние продуктов жизнедеятельности самого общества.

И все же экологические вопросы по-прежнему остаются острыми в промышленном зодчестве, и внимание к ним сегодня не ослабевает. В этой области архитектуры важным является экологический подход, его развитие и совершенствование, возможности и перспективы.

Основная часть. Интерес к вопросам экологии проявился в 70-х гг. XX в., когда человечество после наступления на природу и ее ответа стало искать мира с ней¹. Началась экологизация знания в разных областях, в том числе в архитектуре и градостроительстве. Тогда же сложилась градостроительная экология как самостоятельное научно-практическое направление, изучающее возможности архитектора в деле охраны и улучшения городской среды. Сознательное и целенаправленное использование всех природоохранных средств и мероприятий в процессе проектирования и строительства получило название экологического подхода. Его активно разрабатывали и внедряли в архитектуру и, конечно, в промышленное проектирование, объекты которого по праву считались самыми проблемными с экологической точки зрения.

Сегодня, по прошествии полувека, мы можем оценить направления, по которым группируются средства решения экологических вопросов в промышленной архитектуре. Их три – технологическое, техническое и архитектурно-планировочное направления [2].

Первое, технологическое направление – это использование безотходных и малоотходных технологий. Здесь возможны разнообразные варианты: от получения основного продукта вообще без отходов (например, изготовление деталей методом порошковой металлургии) до превращения отходов каждого производственного цикла в какой-либо полезный продукт (так, отходы при производстве сыра методом баромембранного фракционирования преобразуются в полезный пищевой концентрат). Возможно использование выбросов производства для попутного получения энергии либо другого применяемого в народном хозяйстве продукта.

Как организовывается безотходный или малоотходный процесс? Первый путь – формирование замкнутого цикла производства в рамках одного предприятия. Второй путь – создание территориально-производственных комплексов (ТПК), когда группа предприятий кооперируется на одной площадке и замыкает цикл, отходы первого предприятия становятся сырьем для второго и так последовательно до конца.

Опыт промышленного проектирования в этом направлении показал, что применение безотходных и малоотходных технологий является самым радикальным и перспективным средством решения экологических вопросов, но при этом самым затратным и трудоемким. Сегодня такие технологии разрабатываются в разных отраслях, однако эффективность их тоже разная. Например, нефтепереработка позволяет включить в процесс 95% получаемых отходов, а добывающая отрасль – только 10% [3]. Белорусская практика может продемонстрировать отдельные малоотходные предприятия – завод горного воска в Пуховичах, молочные и сыродельные комбинаты в Слуцке, Ошмянах, Бресте, предприятие «Гронитекс» в Гродно и др. (рисунок 1).

¹ «Человек во взаимоотношениях с природой проходит три этапа: защита от нее, наступление, мир с ней». – К. Доксиадис, архитектор-градостроитель, Греция [4].



Рисунок 1. – Слуцкий сыродельный комбинат, Беларусь

Достаточно успешно развивается принцип безотходного производства в лесной и деревообрабатывающей отраслях, в энергетике. В республике построено более 20 мини-ТЭЦ, которые работают на возобновляемом топливе – древесине и ее отходах, а также могут использовать фрезерный торф и проч. (Петриковская, Речицкая, Лунинецкая, Пружанская мини-ТЭЦ) (рисунок 2).



а



б

а – Лунинецкая мини-ТЭЦ; *б* – Пружанская мини-ТЭЦ

Рисунок 2. – Мини-ТЭЦ в Беларуси

Второе, техническое направление решения экологических вопросов промышленного проектирования заключается в использовании устройств очистки выбросов. Активная деятельность по разработке таких средств началась во второй половине XX в., и сегодня в этой области существует множество направлений, дифференцирующихся по компонентам загрязнений и принципиальным способам их улавливания или устранения. Например, способы очистки воды могут быть механические, биологические, физико-химические, а также их сочетания. За прошедшие годы в науке и практике сложились области, объектом которых являются взятые отдельно составляющие окружающей среды (атмосферный воздух, почвы, водный бассейн и проч.), а предметом – разные подходы к ликвидации загрязнений.

Эффективность технических средств очистки выбросов может быть достаточно высокой, достигать 95–99% по отдельным компонентам и даже в целом по всем загрязнениям на некоторых производствах. Однако в реальной жизни эта цифра на предприятиях разных отраслей промышленности находится в пределах 35–70% [5]. При этом, конечно, технические природоохранные средства относятся к материально затратным, и к тому же энергоемким.

Архитектурно-планировочное направление является третьим в решении экологических задач промышленного проектирования. Оно включает разработку и внедрение в проект именно архитектурных средств, касающихся планировки объекта, его объемно-пространственной и конструктивной организации, материалов, цвета, света, озеленения, ландшафтного благоустройства и проч. Будучи заложенными в объемно-планировочную структуру предприятия, эти приемы позволяют снижать и даже устранять его неблагоприятные воздействия на среду. Очевидно, что

использование таких средств менее ресурсно-затратное, чем технологических и технических. Но также и понятно, что радикального снижения загрязнений с помощью архитектурно-планировочного проектирования достичь не удастся. Тем не менее, рассмотрим это направление и его эффективность подробнее.

Прежде всего следует очертить границы применения архитектурно-планировочных природоохранных средств – на что они могут влиять, а какие факторы окружающей среды абсолютно невосприимчивы к ним. Известно, что промышленный объект способен негативно воздействовать на разные составляющие среды: воздушный и водный бассейны, флору и фауну, почву и др.; при этом негативное влияние может быть видимым, как, например, выброс в атмосферу продуктов горения, или невидимым, ощущаемым только по косвенным признакам, как то – засыхающим деревьям, «зацветшим» водоемам и проч. Достаточно опасными являются электромагнитные и другие излучения, изменение микроклимата, или характеристик среды, определяющих визуальный комфорт для человека. Научные исследования, проведенные в 1980-х гг. [2], показали, что использование архитектурно-планировочных средств в качестве природоохранных может решать следующие задачи: снижение *загрязнения воздушного бассейна*, *нейтрализация изменения микроклиматических показателей*, *предотвращение формирования дискомфорта с точки зрения психофизиологического состояния человека*, *восстановление нарушенных ландшафтов*. И, конечно, архитектурно-планировочные средства участвуют решительным образом в эстетическом, художественном формировании среды. Что же касается влияния на водный бассейн или почвы, растительный и животный мир, то природоохранные архитектурно-планировочные средства здесь, к сожалению, неэффективны, хотя возможно некоторое благоприятное воздействие на экологические показатели за счет градостроительных мер размещения производства в населенном месте.

Загрязнение воздушного бассейна вредными веществами на промышленных объектах происходит в результате производственных выбросов и работы обслуживающего транспорта. Количество первых зависит от технических средств очистки, которыми оснащаются предприятия. Как правило, это касается улавливаемых, так называемых организованных, выбросов, но есть и неорганизованные, попадающие на площадку через проемы, двери, неплотно примыкающие ограждающие конструкции и т.д. Уменьшить количество технологических выбросов архитектурными средствами нельзя, но возможно снизить их концентрации. В случае низких источников выбросов это достигается специальной расстановкой и формой корпусов для обеспечения максимального естественного проветривания площадки; в случае высоких выбросов – увеличением высоты удаляющих устройств (труб, вентиляционных шахт) и их размещением на площадке с учетом розы ветров и имеющегося окружения.

Устранение загрязнений от обслуживающего транспорта с помощью архитектурных средств возможно организацией всей системы проездов на территории предприятия так, чтобы обеспечивалась минимальная длина передвижения транспортных средств и их оптимальная скорость². При этом становится возможным непосредственно влиять на объем загрязнений, это та небольшая область применения архитектурно-планировочных средств, где они являются активными. Сокращение транспортных выбросов особенно актуально в отраслях строительной индустрии, металлургии, тяжелого машиностроения, на предприятиях которых количество обслуживающего транспорта значительно, и проезды могут занимать 35–40% всей территории.

Корректировка общего объема и концентраций загрязнения воздушной среды может, некоторым образом, осуществляться средствами ландшафтной архитектуры – озеленением площадки. Однако расчеты показали, что увеличение нормативных показателей промышленного озеленения (сегодня это 15%) не является путем достижения цели, поскольку поглотить все выбросы в приземном слое зелеными насаждениями нельзя даже на экологически малоопасных объектах [2]. Поэтому имеет смысл сосредотачивать усилия на подборе ассортимента насаждений и приемов посадок с целью использования их способности поглощать, фильтровать и рассеивать вредные вещества.

Формирование оптимального микроклимата на промышленных территориях на первый взгляд кажется неактуальным, тем более в средних широтах, где естественные показатели среды достаточно комфортны для человека. Но именно поэтому такими нежелательными становятся отражение и излучение дополнительного тепла от нагретых солнцем искусственных поверхностей, площадь которых на промышленных площадках очень велика: стены и крыши производственных корпусов и сооружений, покрытия площадок и дорог, проч. Искусственные материалы по сравнению с природными аккумулируют на 10–20% больше солнечной энергии, при этом нагреваются на 15–20 градусов выше, их водонепроницаемость обуславливает увеличение поверхностного стока за счет подземного (70% от выпадающих осадков против 15–20%), тем самым препятствуя расходу накопленного тепла на испарение влаги. Экспериментально получены данные, которые свидетельствуют, что у инсолируемой стены температура воздуха повышается на 1–4 градуса, относительная влажность снижается на 5–10%, а человек, находясь в техногенной среде промышленного объекта, может подвергаться добавочному воздействию тепловой энергии до 1 кал/кв. см, что приравнивается к солнечному облучению [5].

Установлено также, что степень изменения микроклиматических показателей зависит от соотношения техногенной и природной поверхностей, и при равном значении этого соотношения (1:1 или 1:1,2) неблагоприятных изменений микроклимата не возникает. Поскольку регулирование площади всех искусственных плоскостей находится в зоне ответственности архитектора, то архитектурно-планировочные средства становятся основными при формировании оптимального микроклимата на промышленной площадке (рисунок 3).

² Установлено, что количество выхлопных газов увеличивается при снижении скорости движения автотранспорта с 70 до 10 км/ч на 36%, а максимальные выхлопные выбросы наблюдаются при скорости ниже 30 км/час [4].



а



б

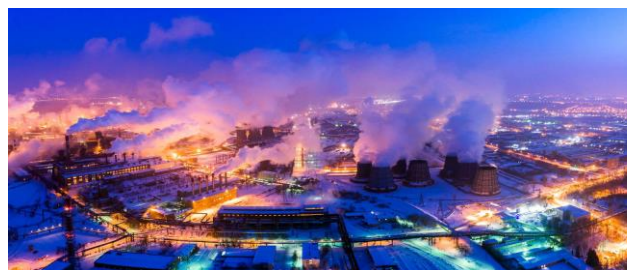
а – техногенная; б – природная

Рисунок 3. – Техногенные и природные поверхности промышленного предприятия

Визуально комфортная среда – это достаточно обширное и, пожалуй, не имеющее однозначных границ понятие. Применительно к промышленным территориям сюда входит, прежде всего, предотвращение формирования у человека дискомфортного состояния с точки зрения его психофизиологии. Большая вероятность возникновения такого состояния обусловлена особыми, специфическими чертами промышленной архитектуры, к которым относятся значительные линейные размеры и масштаб объектов производства, активное присутствие в среде машинных и технических форм, специфика строительных материалов и индустриального строительства, часто рассчитанного на максимальную сборность (рисунок 4).



а



б

а – металлообрабатывающее предприятие в Юзовке, Российская империя, начало XX в.;

б – промышленный узел в Сибири, Россия, XXI в.

Рисунок 4. – Производственная среда

«Зданием можно убить с таким же успехом, что и топором», – это утверждение немецкого художника Г. Цилле в отношении промышленных построек не кажется преувеличенным [6].

Сенсорный психофизиологический уровень восприятия человеком среды – это ощущение ее физических качеств органами чувств, и, прежде всего, зрительными органами. Такое восприятие возможно достаточно объективно оценить, поскольку в основе лежит биологическая сущность человека, которая и обеспечивает всем людям единство психофизиологической организации и социальную общность психического отражения. Исследование с этих позиций производственных территорий показало, что здесь можно выделить участки вероятного возникновения отрицательных психофизиологических реакций – чувства напряженности, подавленности, раздражения и др. Это площадки, как правило, предназначенные для постоянного посещения и длительного пребывания работающих, чья застройка не масштабна человеку, отличается негармоничным сочетанием линейных размеров, монотонной повторяемостью элементов, обилием технического оборудования, замкнутостью пространства и проч., иными словами – это участки, где застройка вынуждена иметь формальные характеристики, способные провоцировать негативное воздействие на психику человека. Безусловно, что нивелирование этого воздействия доступно именно архитектурным средствам, с помощью которых возможно визуально уменьшить или увеличить постройки или их фрагменты, сделать их «понятными», соразмерными человеку, упорядочить, изменить и тем самым гуманизировать среду [2].

Восстановление ландшафтов, нарушенных в процессе производственной деятельности, предполагает участие многих специалистов, которые занимаются технологией рекультивации, обеззараживания почвы, подбором специального ассортимента растений и т.д. Но главное, основное – это пространственная организация среды, когда в итоге создаются практически новые, рукотворные ландшафты, и это становится результатом использования архитектурно-планировочных природоохранных средств.

Ну и, конечно, *эстетические, художественные характеристики среды* находятся полностью в сфере архитектурного проектирования. Вопрос – применимо ли к промышленной застройке понятие «художественного», уже

давно не требует обсуждения. Трехсотлетний период развития промышленной области зодчества продемонстрировал непростой путь признания художественной составляющей в этом виде деятельности. От простого копирования декоративных приемов и стилей гражданской архитектуры, отсутствия обоснованных мотиваций и профессиональных архитекторов в проектировании промышленная архитектура сегодня пришла к выработке собственных архитектурно-художественных средств и приемов, созданию теории композиции, академической подготовке своего штата специалистов. В общую теорию и практику архитектуры было внесено много новаций, причем не только объемно-планировочного и технико-конструктивного свойства, но и художественного. Достаточно упомянуть решающее участие промышленного проектирования в создании функционализма как художественного мировоззрения XX в., а также такого стилистического направления как high tech [7] (рисунки 5, 6).

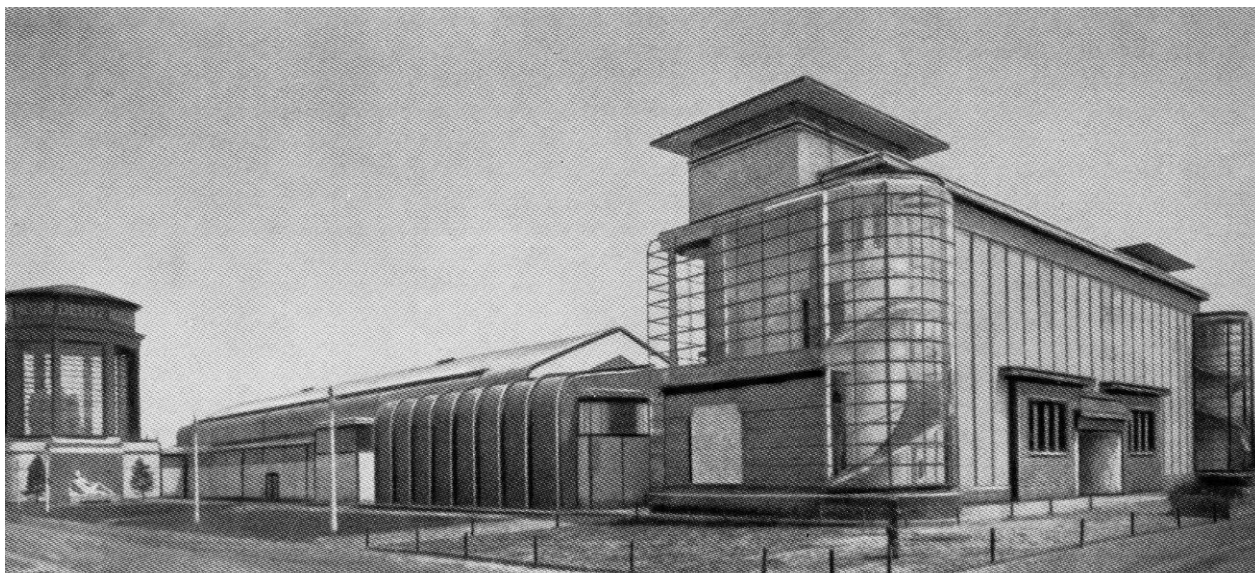


Рисунок 5. – Показательная фабрика на выставке Веркбунда в Кельне, Германия, начало XX в.



а



б

а – фасад; б – фрагмент

Рисунок 6. – Программный объект стилистического направления high tech – «Фабрика культуры», центр Помпиду в Париже, Франция, вторая половина XX в.

Заключение. Подводя итог развитию экологического подхода в промышленной архитектуре следует констатировать, что природоохранные мероприятия сегодня идут по трем направлениям – технологическому, техническому и архитектурно-планировочному. Наиболее радикальными являются первые два направления, с помощью которых можно непосредственно уменьшать количество выбросов и вредных воздействий производственных объектов на среду.

Архитектурно-планировочные средства с этой точки зрения относятся к так называемым пассивным, их диапазон – это снижение не объемов, а концентраций загрязнений, не негативных воздействий объекта, а их последствий. Однако при этом арсенал экологических мероприятий достаточно велик и разнообразен, в него входят: поиск формы, габаритов, способов расстановки корпусов, обеспечивающих достаточное проветривание площадки; организация проездов минимальной длины и пересечений, что способствует снижению выбросов транспорта; уменьшение

площади искусственных, техногенных поверхностей; разработка приемов озеленения, обеспечивающих максимальную нейтрализацию загрязнений в воздушном бассейне, а также корректировку микроклиматических показателей среды и проч.

Такое многообразие приемов при их совокупном использовании в процессе промышленного проектирования может дать ощутимые результаты. К тому же архитектурно-планировочные природоохранные средства широко доступные и мало затратные, а для решения отдельных экологических проблем они, порой, являются главными и даже единственными, как, например, при восстановлении нарушенных ландшафтов, снижении шумового или так называемого визуального загрязнения городских территорий, создании эстетически приемлемой, гармоничной среды.

Ну и, кроме того, необходимость дальнейшего развития сегодня архитектурно-планировочного природоохранного направления в промышленном проектировании обосновывается достаточно невысокой пока еще общей эффективностью технических систем очистки выбросов, проблематичностью быстрого совершенствования технологий и наличием значительного ущерба от загрязнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krufft H.-V. A history of architectural theory: from Vitruvius to the present. – London: Zwemmer; New York: Princeton Architectural Press, 1994. – 706 p.
2. Морозова Е.Б. Архитектура промышленных объектов: прошлое, настоящее и будущее. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 316 с.
3. Алещенко Н.В. Особенности архитектурного проектирования промышленных предприятий с учетом природоохранных требований. – М.: Ротапринт МАРХИ, 1985. – 88 с.
4. Мастера архитектуры об архитектуре / Под ред. А.В. Иконникова. – М.: Искусство, 1972. – 590 с.
5. Чистякова С.Б. Охрана окружающей среды. – М.: Стройиздат, 1988. – 272 с.
6. Нагель О. Генрих Цилле. – М.: Академия художеств СССР, 1962. – 103 с.
7. Морозова Е.Б. Промышленное здание в истории архитектуры. – Минск: БНТУ, 2017. – 302 с.

REFERENCES

1. Krufft, H.-V. (1994). *A history of architectural theory: from Vitruvius to the present*. London: Zwemmer; New York: Princeton Architectural Press.
2. Morozova, E.B. (2003). *Arkhitektura promyshlennykh ob'ektov: proshloe, nastoyashchee i budushchee*. Minsk: UP «Tekhnoprint». (In Russ.).
3. Aleshchenko, N.V. (1985). *Osobennosti arkhitekturnogo proektirovaniya promyshlennykh predpriyatii s uchetom prirodookhrannykh trebovaniy*. Moscow: Rotaprint MARKHI. (In Russ.).
4. Ikonnikov, A.V. (Eds.). (1972). *Mastera arkhitektury ob arkhitekture*. Moscow: Iskusstvo. (In Russ.).
5. Chistyakova, S.B. (1988). *Okhrana okruzhayushchei sredy*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
6. Nagel', O. (1962). *Genrikh Tsille*. Moscow: Akademiya khudozhestv SSSR. (In Russ.).
7. Morozova, E.B. (2017). *Promyshlennoe zdanie v istorii arkhitektury*. Minsk: BNTU. (In Russ.).

Поступила 21.02.2024

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF INDUSTRIAL ARCHITECTURE

YE. MOROZOVA

(Belarussian National Technical University, Minsk)

The article is about the environmental approach in industrial design. The technological, technical and architectural environmental protection tools, their development and improvement, opportunities and prospects in the conditions of the Republic of Belarus are investigated.

Keywords: industrial architecture, environmental protection tools, ecological approach, industrial design, environmental protection.

UDC 620.179.17

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-34-38

MONITORING OF FIBROBLAST AT AN EARLY AGE BY THE METHOD OF ACOUSTIC EMISSION

E. BOROVKOVA, Candidate of Technical Sciences D. SHABANOV
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article presents the main results of acoustic emission monitoring of concrete and fibro-concrete at an early age. The main characteristics of acoustic signals arising in a concrete mixture during the structuring of concrete with and without structural reinforcement are presented. In the course of the study, the influence of reinforcement on the processes of acoustic signal extraction during the formation of concrete samples was determined. The physico-chemical processes occurring inside the concrete mixture, associated with internal structural changes and, as a consequence, hydration stages, are interconnected with acoustic emission, which is sensitive to the capture of numerous elastic wave signals during the formation of the structure under various conditions.

Keywords: fiber concrete, structuring, acoustic emission, concrete mix.

Introduction. Monitoring the early stage of the material is important, as this stage largely determines the final properties of the hardened concrete. Concrete – an artificial construction conglomerate is a system of many atoms (elements) that develops over time. The structure of concrete is extremely complex, is in continuous change (dynamics) from the moment of bringing components of concrete in contact with water and until the loss of operational properties of the concrete structure. Since the properties of concrete and its behavior are determined by its structure, it is necessary to look for a change in its dynamics and, conversely, for every change in dynamics detected in it one should look for a transformation of the structure¹.

One of the most promising methods for studying structural changes in freshly prepared concrete is the acoustic emission (AE) method. This method of non-destructive control is based on the generation of elastic waves during structural changes of the material [1]. Sufficiently rapid physical processes of structural changes in a limited volume of material (plastic deformation, fracture, formation and growth of cracks, disruptions of dislocation clusters from attachment points, phase transformations, the origin of microdefects, friction, etc.) are accompanied by the emission of acoustic waves [2]. The AE method makes it possible to detect (and in many cases identify) nanostructural changes in solids, since it records single acts with an energy of up to 10–16 J [3]. The AE method registers acoustic signals emitted by the concrete structure itself during its formation. Studies by a number of authors^{2,3} [4–6] have shown the possibility of using the AE method for monitoring freshly prepared concrete at the hardening stage. This method is preferable because it shows the sensitivity of capturing numerous elastic wave signals during the setting of the material. Using the AE method, it is possible to register the internal structural activity of concrete during its hardening⁴. In this paper, informative parameters of acoustic signals at the main stages of structuring concrete samples are highlighted.

Equipment and materials for experimental research. To measure the AE parameters, the AE system A-Line DDM–1, manufactured by INTERU-NIS-IT LLC, was used. AE equipment works only with electrical signals, therefore, piezoelectric converters are mainly used for receiving and emitting acoustic waves, transforming acoustic vibrations into electric voltage fluctuations and vice versa [3]. Therefore, in order to register and convert the energy of elastic mechanical waves into an electrical signal, bandpass converters manufactured by Don Measuring Systems LLC – GT200, with an operating frequency range from 130 to 200 kHz, were connected to the AE modules. The advantage of piezoelectric transducers is that they are highly sensitive to deformations and acoustic vibrations. The operation of these converters is based on the phenomenon of the piezoelectric effect. When some dielectrics are deformed, an asymmetric displacement of electric charges occurs and, as a result, un-compensated surface charges arise at the boundaries of the material. An electric field appears in the material, and an electric voltage appears at its boundaries [3]. For greater acoustic contact between the AE converter and the freshly

¹ Shabanov, D.N., Yagubkin, A.N. & Borovkova, E.S. (2020). Monitoring urovnei dinamiki strukturoobrazovaniya tsementnogo kamnya metodom akusticheskoi emissii i prognozirovaniye resursa na ego etapakh tverdeniya. In L.M. Parfenova (Eds.) Arhitekturno-stroitel'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii: elektron. sb. st. II mezhdunar. nauch. konf., Novopolotsk, 28–29 noyab. 2019 g. (272–279). Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ.). URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/25588>.

² Hoduláková, M., Topolář, L. & Kucharczyková, B. (2019). The application of acoustic emission technique to monitor the early setting process of cement pastes // MATEC Web of Conferences: 3rd International Conference on Building Materials and Materials Engineering. – P. 1–4. DOI: 10.1051/mateconf/201930304002.

Shawkey, M.A., Abdelzaher, M.A., Mahmoud, H.M. & Rashad, M.M. (2020). Monitoring of acoustic emission behaviour during early-age cement paste hydration // Materials Science and Engineering: 5th International conference on advanced sciences ICAS5, Hurghada, Egypt, 10–12 November 2020. – P. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/1046/1/012020.

Shen, G., Zhang, J. & Wu, Zh. (2019). Advances in Acoustic Emission Technology // Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission, Guangzhou, China, 2019. – P. 41–53. DOI: 10.1007/978-981-15-9837-1.

Bardakov, V.V. & Sagaidak, A.I. (2016). Forecasting of concrete strength during the hardening process by means of Acoustic Emission method // Progress in Acoustic Emission: 8th International Conference on Acoustic Emission III AE, Kyoto, 2016. – P. 105–110.

³ Pazdera, L., Topolar, L., Korenska, M., Smutny, J. & Bilek, V. (2014). Advanced analysis of acoustic emission parameters during the concrete hardening for long time // 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic, 6–10 October 2014. – P. 1–8. URL: https://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/384_Pazdera.pdf.

⁴ Sagaidak, A.I. & Borovkova, E.S. (2021). Opredelenie prochnostnykh kharakteristik betona pri ego tverdenii s pomoshch'yu metoda akusticheskoi emissii // Sovremennye voprosy mekhaniki sploshnykh sred: materialy conf., Cheboksary, 23–24 noyab. 2021 g. – S. 98–108. (In Russ.). URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=HJzHKRcAAAAJ&citation_for_view=HJzHKRcAAAAJ:hqOjcs7Dif8C.

prepared concrete mixture, a steel waveguide was used, shown in figure 1. The AE converter was installed on the waveguide through a contact lubricant and fixed with a magnetic holder. The waveguide, in turn, was immersed in concrete until the plate touched the composition.



Figure 1. – Waveguide view

As the studied samples, a concrete mixture with an W/C ratio of 0,5 was used, which was poured into metal molds. Table 1 presents the materials of the studied samples. For dispersed reinforcement of concrete, metal (most often steel) and non-metallic (mineral, polymer, etc.) high- and low-modulus fibers of various lengths and cross-sections are used. Steel fiber is obtained by cutting low-carbon wire, foil or sheet steel, forming from melt, milling strips and slabs, as well as in the result of the turning process [7].

Table 1. – Characteristics of the materials used for the manufacture of the studied samples

Material	Basic information	Weight, kg
Binder	Portland Cement CEM I 42,5N (JSC "KRICHEVTSEMENTNOSHIFER"), with a specific surface area of 3615 cm ² /g, a normal density of NG = 26,5%	11
Sand	Quarry sand sifted fractions up to 5 mm	12
Crushed stone	Crushed stone fractions of 5–25 mm	26
Reinforcing material	Steel anchor fiber with a diameter of 1 mm and a length of 50 mm (RUE "Belarusian Metallurgical Plant")	40 kg per 1 m ³

Registration and analysis of parameters of acoustic emission signals of concrete structuring under natural hardening conditions was carried out continuously for three days from the moment of preparation of the concrete mixture. Part of the experimental setup is shown in figure 2.

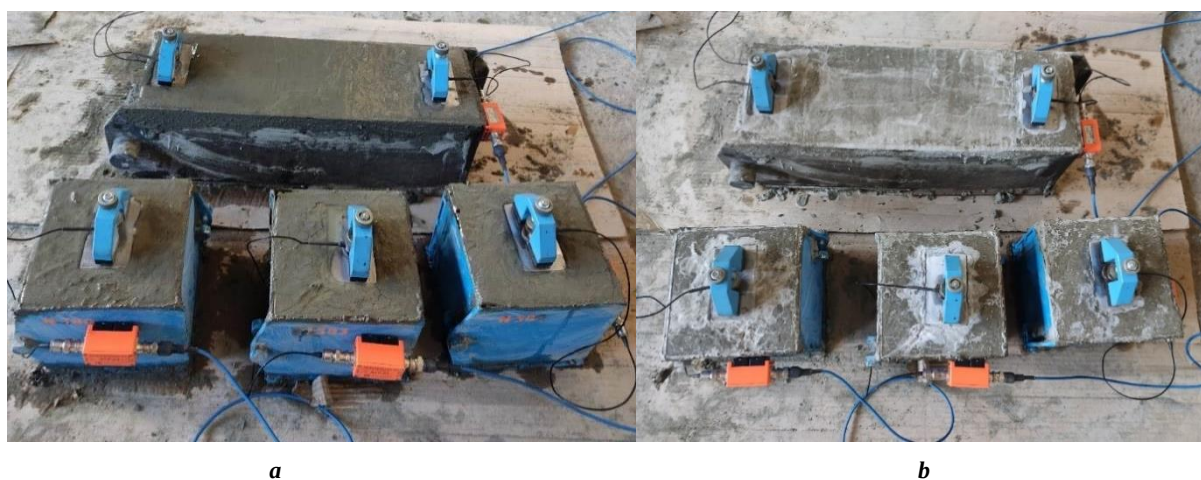


Figure 2. – Conducting an experiment at the initial stages of structuring (a),
on the third day of structuring samples (b)

Results and problematic. Acoustic emission signals propagating to the sample surface undergo significant changes due to the dispersion of the speed of sound, the transformation of wave types during diffraction, reflection, refraction, attenuation. The reason for the peculiarity of the laws of acoustic wave propagation in a concrete mixture is the variability

of the acoustic resistance of the concrete components: cement stone; crushed stone or gravel; sand and pores filled with air and water [8]. The AE source in the sample emits spherical longitudinal and transverse waves. In this case, the high-frequency component of the signal undergoes attenuation, due to the directly proportional dependence of the attenuation coefficient in the material and the frequency. There are signals whose amplitude decreases with distance much slower than for a spherical wave. As a result, mainly this type of signals is registered⁵. The main task of AE control at the early stage of concrete hardening is the appearance of indicators that reflect the main periods of structuring associated with hydration processes, which will allow determining the disintegrating strength, predicting the strength of concrete, and monitoring the strength of concrete during the hardening process [8].

The properties of fiber concrete are determined by the type of fibers and concrete used, their quantitative ratio and depend on the state of contacts at the interface of phases, the introduction of fibers helps to improve the structure and properties of the initial concrete, increase its durability and durability. Reinforcement with steel fibers changes the properties of the material, as a result of the addition of steel fibers, a new composite is formed – steel fiber concrete [9].

The influence of reinforcing fibers at the early stage of hardening on AE signals can be traced in figure 3. In the first period of the structure formation of the background (the dissolution stage), there is a constant bombardment of free water molecules on the surface due to their Brownian motion, internal forces of interaction between particles arise, migration of water and gas bubbles is observed. AE activity in the first period is high and approximately the same in samples with and without fiber, the amplitude of the signals in the samples reaches a maximum value of 94 dB (figure 3, *a*). And in samples with dispersed reinforcement, additional surface tension forces of water arise on steel fibers, which is why the cumulative amplitude of the signals is higher – 21762 dB, than in concrete samples without fiber – 7527 dB (figure 3, *b*). The higher the AE activity within the first period and the higher the amplitude the mechanical movement of the mixture and its individual components⁶.

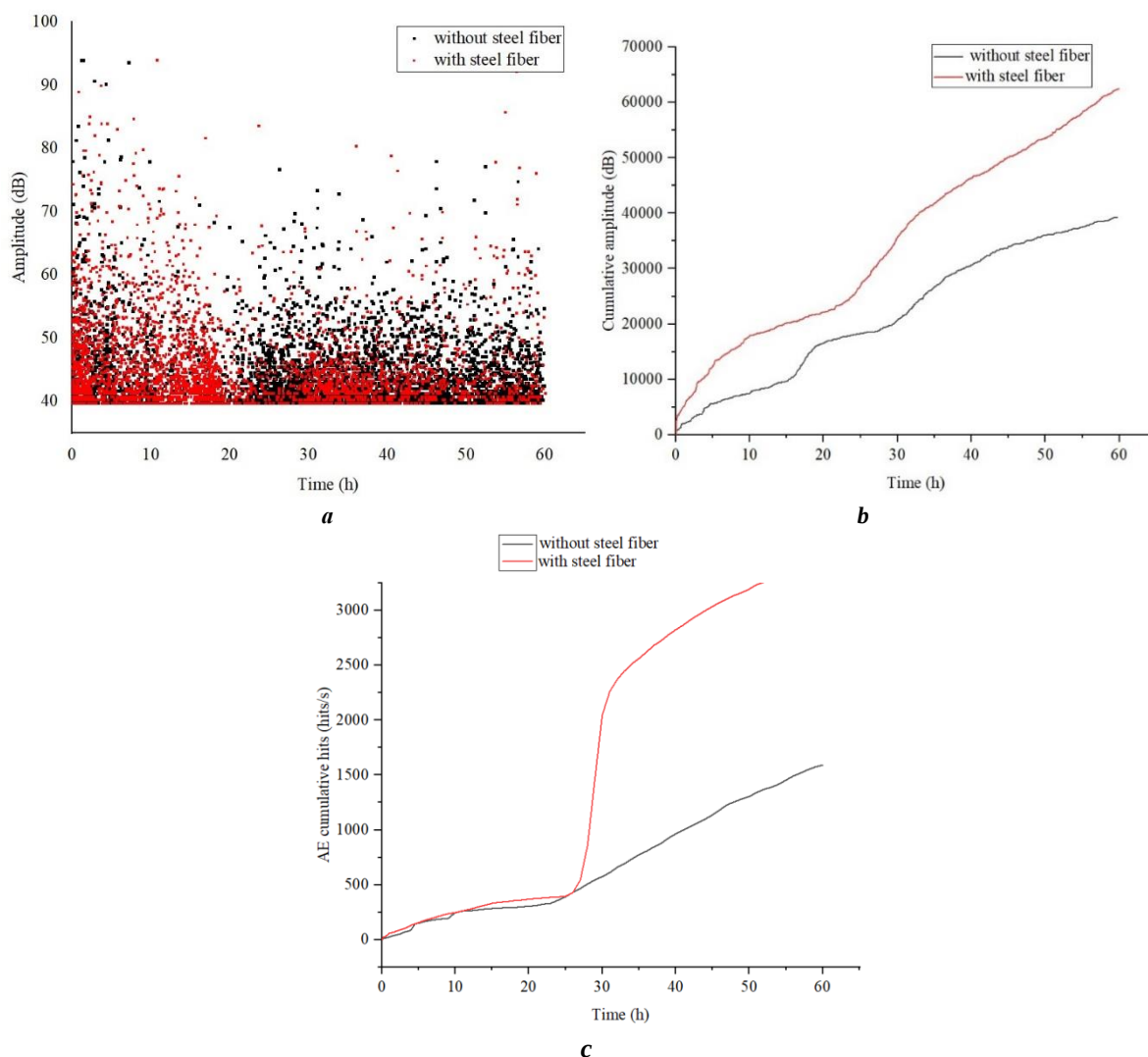


Figure 3. – Dependence of the amplitude of acoustic signals (*a*), cumulative amplitude (*b*) and AE cumulative hits (*c*) on the hardening time of the concrete mixture with and without reinforcing material

⁵ See footnote 1.

⁶ See footnote 3.

The second stage of structuring (the setting period) is characterized by a long duration in samples with and without fiber. So the time interval of the second period for a concrete sample is 15 hours, and for a sample of fibroblast is 9 hours. By the end of the second period, the total pulse count for a sample with fiber was 2260 hits/s and the cumulative amplitude was 37689 dB, and in samples without fiber, the acoustic characteristics were 396 hits/s and 18132 dB, respectively (figure 3, b, c). In this period, i.e. in the period of stabilization of structural strength, there is a decrease in the recorded acoustic signals due to the high attenuation coefficient of the forming structure. This period is characterized by the appearance of flocculation forces of surface interaction, as well as the formation of a double electric Gemholtz layer, which affects the formation of the coagulation structure of the cement gel [10]. When structuring the concrete mixture with fiber inclusions, additional intermolecular and electrostatic forces arise, the internal friction forces of the matrix components increase, which leads to their limited movement in the presence of steel fibers, and therefore to a decrease in AE signals.

The main causes of attenuation of sound waves include scattering and absorption. Scattering is associated with the propagation of acoustic signals in a strictly non-homogeneous medium. Individual components media, for example, pores and foreign inclusions, have different densities and propagation speeds of incident rays, and as a consequence, different acoustic resistance (figure 4). Absorption, as mentioned above, is primarily directly related to the conversion of sound energy into heat. As a rule, the absorption is greater the faster the oscillations occur, that is, the higher the frequency of the sound wave. Therefore, absorption increases in proportion to the increase in frequency, that is, slower than scattering.

The shorter the duration of the second period, the more active the process of structuring takes place, which means that the design strength of the samples is higher. The strength for 28 days of the concrete sample was 49,5 MPa, and the fiber-concrete sample was 52,5 MPa.

The inclusion of reinforcing fibers leads to accelerated crystallization processes in the mineral part of the composite, therefore, in the third period (the period of crystallization) in a fiber-reinforced concrete sample, the activity of AE pulses and cumulative amplitude is higher than in samples with no dispersed reinforcement. By the end of the third period, the total pulse count for a sample with fiber was 32 pulses/s and the cumulative amplitude was 62432 dB, and in samples without fiber, the acoustic characteristics were 1591 pulses/s and 39276 dB, respectively. The higher the AE activity during this period, the higher the final strength of the material.

Conclusion. Variations in energy and power characteristics during the structuring of the material lead to changes in acoustic signals, therefore, the AE parameters in concrete samples with the addition of steel fiber differ from the AE parameters in the absence of dispersed reinforcement. This proves the sensitivity of the non-destructive passive control method, as an AE method that captures any changes in the structure. According to the change in AE parameters over time, three time intervals can be distinguished, characterized by varying degrees of AE intensity and the number of recorded pulses. It was found that each of the three time intervals corresponds to different periods of concrete structure formation. The analysis of acoustic emission parameters during the hardening of concrete mixtures allows us to identify characteristic periods of hydration, determine the kinetic parameters of hydration, and evaluate the effect of additives on the properties of concrete. The acoustic-emission method of concrete control at an early age will allow determining the decaying strength, predicting the strength of concrete, and monitoring the strength of concrete during the hardening process. The acoustic-emission control method will allow us to quickly determine the physical and mechanical properties of concrete, make adjustments when concreting structures and thereby ensure the reliability of structures and the safety of buildings and structures [11].

REFERENCES

1. Borovkova, E.S. & Shabanov, D.N. (2021). Fizicheskie svoystva strukturnykh izmenenii v betone [Physical properties of structural changes in concrete]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, (8), 39–42. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Morozov, N.F. & Petrov, Yu.V. (1997). *Problemy dinamiki razrusheniya tverdykh tel*. Saint Petersburg: SPbGU, 1997. (In Russ.).
3. Bekher, S.A. & Bobrov, A.L. (2013). *Osnovy nerazrushayushchego kontrolya metodom akusticheskoi emissii: ucheb. posobie*. Novosibirsk: SGUPS. (In Russ.).
4. Trąpczyński, W., Goszczyńska, B. & Bacharz, M. (2020). Acoustic emission for determining early age concrete damage as an important indicator of concrete quality/Condition before Loading. *Materials*, 13(16). DOI: 10.3390/ma13163523.
5. Dzaye, E.D., Schutter, G.D. & Aggelis, D.G. (2018). Study on mechanical acoustic emission sources in fresh concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(3), 742–754. DOI: 10.1016/j.acme.2017.12.004.
6. Di Bella, C., Griffa, M., Ulrich, T.J. & Lura, P. (2016). Early-age elastic properties of cement-based materials as a function of decreasing moisture content. *Cement and Concrete Research*, (89), 87–96. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.08.001.
7. Magdeev, U.H., Pukharev, Yu.V., Morozov, V.I., Pantelev, D.A. & Zhavoronkov, M.I. (2013). Issledovanie svoystv stalefibrobetona na osnove amorfnoi metallicheskoj fibry. *Vestn. Volgogradskogo gos. arkhitekturno-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhitektura [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture]*, 31(50), 132–135. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Shabanov, D.N., Yagubkin, A.N., Vabishchevich, S.A., Borovkova E.S. & Trambitskii, E.A. (2019). Parametry signalov akusticheskoi emissii i ikh primeneniye pri monitoringe sostoyaniya struktury betona [Parameters of acoustic emission signals and their application in monitoring the state of the concrete structure]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, (8), 74–78. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Serova, R.F., Rakhimova, G.M., Stasilovich, E.A. & Aidarbekova, S.Zh. (2018). Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv dispersno-armirovannykh betonov [Research of physicomaterial properties of dispersed-reinforced concrete]. *Epokha nauki. Tekhnicheskie nauki*, (14), 192–200. DOI: 10.1555/2409-3203-2018-0-14-192-200. (In Russ., abstr. in Engl.).

10. Akhverdov, I.N. (1981). *Osnovy fiziki betona*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
11. Sagaidak, A.I., Bardakov, V.V. & Borovkova, E.S. (2023). Razrabotka metodiki kontrolya i prognoza prochnosti betona v rannem vozraste metodom akusticheskoi emissii [Development of methods for monitoring and predicting the strength of concrete at an early age by acoustic emission method]. *Beton i zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*, 1(615), 33–42. DOI: 10.37538/0005-9889-2023-1(615)-33-42. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 06.12.2023

МОНИТОРИНГ ФИБРОБЕТОНА В РАННЕМ ВОЗРАСТЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Е.С. БОРОВКОВА, канд. техн. наук **Д.Н. ШАБАНОВ**
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье представлены основные результаты акустико-эмиссионного мониторинга бетона и фибробетона в раннем возрасте. Представлены основные характеристики акустических сигналов, возникающих в бетонной смеси при структурировании бетона с дисперсным армированием и без него. В ходе исследования было определено влияние армирования на процессы выделения акустического сигнала при формировании бетонных образцов. Физико-химические процессы, происходящие внутри бетонной смеси, связанные с внутренними структурными изменениями и, как следствие, этапами гидратации, взаимосвязаны с акустической эмиссией, которая чувствительна к захвату многочисленных сигналов упругих волн во время формирования структуры в различных условиях.

Ключевые слова: фибробетон, структурирование, акустическая эмиссия, бетонная смесь.

УДК 624.072

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-39-44

СТАТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ БАЛОЧНОЙ ПЛИТЫ НА ОДНОРОДНОМ УПРУГОМ ОСНОВАНИИ С УЧЕТОМ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ*канд. техн. наук О.В. КОЗУНОВА¹⁾, А.Г. ПУСЕНКОВ²⁾**(¹⁾ Белорусский национальный технический университет, Минск,**²⁾ завод КПД ОАО «Гомельский ДСК»)**¹⁾ kozunova@gmail.com, ²⁾ pusenkov_a@mail.ru*

В статье рассматриваются публикации статического расчета, позволяющие определить напряженно-деформированное состояние (НДС) упругого основания под балочной плитой без учета касательных напряжений (продольных деформаций) в зоне контакта, а также приводится новая методика расчета с их учетом. Проводится числовая апробация вариационно-разностным методом (ВРМ) и верифицируются результаты для оценки влияния касательных напряжений на НДС упругого основания.

Ключевые слова: упругое однородное основание, балочная плита, осадки основания, напряженно-деформированное состояние, касательные напряжения, контактная зона.

Введение. Актуальность данной статьи связана с тем, что в расчетах конструкций на упругом основании учитывают только нормальные напряжения в зоне контакта. В представленной работе авторы применяют (усложняют) методику расчета, учитывая касательные напряжения (продольные деформации).

Статическими расчетами балочных плит на упругом основании занимались следующие отечественные ученые:

1. Клубин П.И. проводил расчет *способом ортогональных многочленов*. Данный способ более точен, чем гипотезы Винклера, и учитывает особенности реактивных давлений основания. Статический расчет заключается в решении системы из дифференциального уравнения изгиба плиты и интегрального уравнения для осадок с соблюдением условий равновесия и удовлетворением граничных условий. Однако возникают сложности при расчетах плит переменной жесткости и при воздействии на плиту произвольной нагрузки [1].

2. Жемочкин Б.Н. предложил заменить сплошной контакт основания и балочной плиты *точечными связями в виде жестких вертикальных стержней*. Количество таких стержней определяется произвольно, но чем больше их принято, тем точнее результат расчета. Для удержания балки от боковых смещений используется горизонтальный стержень (рисунок 1).

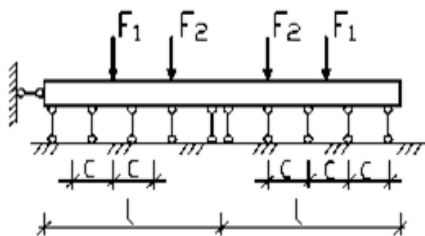


Рисунок 1. – Расчетная схема балки

Получается статически неопределимая система, решение которой проводится смешанным способом строительной механики. Между балкой и основанием стержневые связи заменяют неизвестными силами $X_1, X_2, \dots, X_n$ и вводят горизонтальную заделку в сечении балки [2].

3. Яголковский С.Н. для расчета предложил использовать упругий слой, который сцеплен с недеформируемым основанием в зоне взаимодействия с балкой. Такой способ по сравнению со смешанным методом приводит к уменьшению числа неизвестных, однако гораздо сложнее определяются коэффициенты при неизвестных [3].

4. Дураев А.Е., Сеницын А.П. и др. предложили способ решения *методом конечных разностей*. При помощи данного метода на расчетной области непрерывного изменения аргумента строится сетка с конечным множеством точек (узлов). Вместо функций непрерывного аргумента рассматривают функции, определенные только в узлах сетки – сеточные функции. Производные, которые входят в дифференциальное уравнение и краевые условия, заменяют их разностными аналогами – линейными комбинациями значений сеточных функций в некоторых узлах сетки. В результате краевую задачу заменяют дискретной краевой задачей (разностной схемой), представляющей собой систему конечного числа линейных или нелинейных алгебраических уравнений. Эту систему уравнений решают с получением приближенного значения решения в узлах.

Проблемой МКР является построение правильной разностной схемы, т.к. для одной такой задачи возможно построить множество разностных схем, а также он не может быть применен для абсолютно жесткой конструкции [4; 5].

5. Горбунов-Посадов М.И. в своих работах использовал уравнения для определения коэффициентов *степенного ряда* и таблицы для расчета определяемых параметров балочных, прямоугольных и осесимметрично нагруженных круглых плит на упругом однородном изотропном полупространстве.

Такой метод расчета совпадает с методом расчета полос в условиях плоской задачи, но имеет отличия в том, что функции влияния берутся от нагрузки поверхности основания по прямоугольнику, а не по линии [6].

Также статические расчеты предложены в работах Е.Ф. Винокурова с итерационным методом нелинейных расчетов [7]. В статье В.Г. Федоровского предлагается реализация итеративного алгоритма Шварца методом конечных элементов (МКЭ) плиты на любой модели упругого основания [8].

Однако все решения контактных задач происходят в традиционной постановке, т.е. без учета касательных напряжений в зоне контакта.

Различные вариации балочных плит и упругих оснований не позволяют получить строгое решение пространственной задачи. В связи с этим допускается приближенное решение, при котором касательные напряжения и жесткость балочной плиты определяют строго в плоской постановке. Эти факторы используются для приближенной оценки влияния на результаты расчетов существующими методами, но без их учета¹.

Решение задачи биконтактного взаимодействия основания и плиты с учетом касательных напряжений (продольных деформаций) в зоне контакта представляет собой разновидность задачи теории упругости [9]. Решение данной задачи можно выполнить в нелинейной постановке при работе упругих сред в зоне небольших упруго-пластических деформаций, т.е. с учетом физической нелинейности.

Нелинейный расчет деформирования балочной плиты позволяет выполнить более достоверную оценку работы плиты по предельным состояниям эксплуатационной пригодности за счет перераспределения и уменьшения максимальных значений усилий. Также можно отметить, что при таком расчете возникает возрастание неравномерности осадок.

Постановка задачи. На упругом однородном основании глубиной (толщиной) H расположена балочная плита ленточных фундаментов с приложенной внешней нагрузкой $q(x)$. Параметры плиты следующие: высота плиты h , ширина плиты $2l$, изгибная жесткость EJ .

Вводим гипотезы (предположения) и допущения для расчета балочных плит на упругом основании:

- 1) допущения и гипотезы теории упругости справедливы для рассчитываемой области упругого основания;
- 2) допущения и гипотезы плоского изгиба балки (плиты) справедливы для плиты;
- 3) при моделировании контактной зоны между балочной плитой и основанием могут возникать и растягивающие, и сжимающие напряжения, силы трения при моделировании учитываются, также учитываются касательные напряжения в зоне контактного взаимодействия.

Алгоритм решения задачи. Задача решается вариационно-разностным методом (ВРМ)², который реализуется в перемещениях через конечно-разностные соотношения теории упругости (вид плоской деформации) при использовании в решении функционала полной потенциальной энергии деформации системы, состоящей из фундаментной плиты, непросадочных грунтов основания и зоны контактного взаимодействия.

Основание заменяется прямоугольной расчетной областью и аппроксимируется разбивочной сеткой конечных размеров с постоянным шагом по осям (рисунок 2). На границах расчетной области перемещения равны нулю, а в зоне контакта осадки основания – соответствуют прогибам плиты.

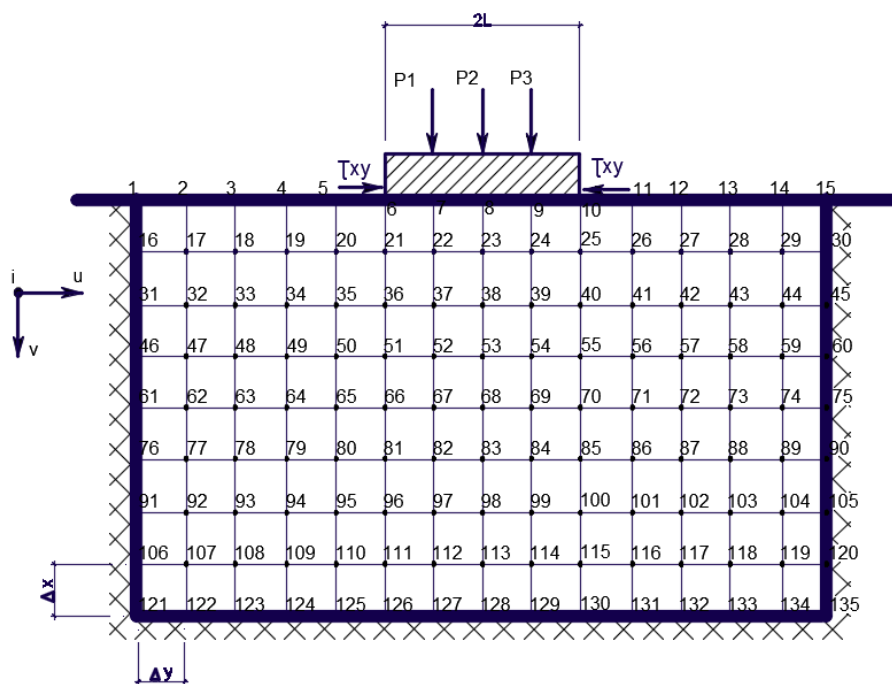


Рисунок 2. – Разбивочная сетка расчетной области

¹ Руководство по проектированию плитных фундаментов каркасных зданий и сооружений башенного типа. Разработано к СНиП II-15-74. – М.: Стройиздат, 1984. – 265 с.

² Козунова О.В. Особенности проектирования плитных фундаментов на многослойных основаниях со слабыми слоями грунтов // Рекомендации по проектированию и устройству рациональных фундаментов на основаниях, сложенных озерно-ледниковыми и лессовидными грунтами: Р 5.01.056.09: введ. 01.10.09. – Минск: Стройтехнорм, 2009. – Гл. 8. – С. 39–47.

За неизвестные принимаем: $u_i(x, y)$, $v_i(x, y)$ – компоненты вектора перемещения i -той узловой точки основания, направленные вдоль осей X и Y соответственно; $p_y^{(i)}(x, y)$ – реактивные давления в зоне контакта балочной плиты с основанием, $\tau_{xy}^{(i)}(x, y)$ – касательные напряжения.

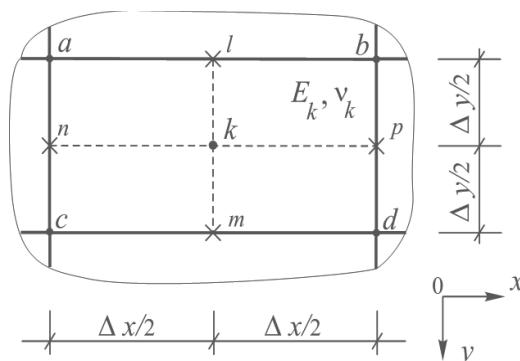


Рисунок 3. – Прямоугольная ячейка МКР

Зависимость интенсивности напряжений и деформаций для упругого однородного основания определяется по следующей формуле³:

$$\sigma_i = \sigma_y \operatorname{th} \left(\frac{E}{\sigma_y} \varepsilon_i^{(k)} \right), \quad (1)$$

где σ_y – предел текучести основания;

E – начальный модуль деформации основания;

$\varepsilon_i^{(k)}$ – интенсивность деформаций в точке k упругого основания.

Интенсивность деформации имеет следующее выражение:

$$\varepsilon_i^{(k)} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x^{(k)} - \varepsilon_y^{(k)})^2 + (\varepsilon_y^{(k)})^2 + (\varepsilon_x^{(k)})^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^{(k)})^2}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_x^{(k)}$, $\varepsilon_y^{(k)}$, $\gamma_{xy}^{(k)}$ – деформации в точке k . Они определяются по соотношению Коши:

$$\varepsilon_x^{(k)} = \frac{\partial u_k}{\partial x} = \left(\frac{u_b + u_d}{2} - \frac{u_a + u_c}{2} \right) \cdot \frac{1}{\Delta x} = \frac{u_b + u_d - u_a - u_c}{2\Delta x}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_y^{(k)} = \frac{\partial v_k}{\partial y} = \left(\frac{v_c + v_d}{2} - \frac{v_a + v_b}{2} \right) \cdot \frac{1}{\Delta y} = \frac{v_c + v_d - v_a - v_b}{2\Delta y};$$

$$\begin{aligned} \gamma_{xy}^{(k)} &= \frac{\partial u_k}{\partial y} + \frac{\partial v_k}{\partial x} = \left(\frac{u_c + u_d}{2} - \frac{u_a + u_b}{2} \right) \cdot \frac{1}{\Delta y} + \left(\frac{v_b + v_d}{2} - \frac{v_a + v_c}{2} \right) \cdot \frac{1}{\Delta x} = \\ &= \frac{u_c + u_d - u_a - u_b}{2\Delta y} + \frac{v_b + v_d - v_a - v_c}{2\Delta x}. \end{aligned} \quad (4)$$

Энергия деформаций прямоугольной ячейки имеет следующее выражение:

$$U_{i,j}^{(k)} = \frac{E_k}{2(1+\nu_k)} \left[\frac{\nu_k}{1-2\nu_k} (\varepsilon_x^{(k)} + \varepsilon_y^{(k)})^2 + (\varepsilon_x^{(k)})^2 + (\varepsilon_y^{(k)})^2 + \frac{1}{2} (\gamma_{xy}^{(k)})^2 \right] \Delta x \Delta y. \quad (5)$$

³ Босаков С.В., Машкова (Козунова) О.В. Расчет балки на упругой физически нелинейной полуплоскости // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы X междунар. науч.-метод. межвуз. семинара. – Гомель: БелГУТ, 2005. – С. 40–43.

Величина полной потенциальной энергии балочной плиты на упругом основании $\mathcal{E}$ состоит из суммы энергии деформации плиты U , энергии деформации упругого основания A и работы внешней нагрузки Π :

$$\mathcal{E} = U + A + \Pi. \quad (6)$$

В соотношении определения полной энергии деформации упругого основания A (6), авторами предлагается усложнение расчета за счет учета касательных напряжений в зоне:

$$A = U_f + U_t, \quad (7)$$

где U_f – энергия деформации упругого основания (плоская деформация)⁴;

U_t – энергия продольных деформаций в контактной зоне плиты с основанием.

Энергия деформаций упругого основания

$$\begin{aligned} U_f = \sum_{j=1}^{MY-1} \left(\sum_{i=1}^{NX-1} U_{i,j}^{(k)} \right) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{MY-1} \left(\sum_{i=1}^{NX-1} \left(\frac{E_k}{1+\nu_k} \cdot \left[\frac{\nu_k}{1-2\nu_k} \cdot \left(\frac{1}{2\Delta x} (u_b + u_d - u_a - u_c) + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{1}{2\Delta y} \cdot (v_c + v_d - v_a - v_b) \right) \right]^2 + \left(\frac{1}{2\Delta x} \cdot (u_b + u_d - u_a - u_c) \right)^2 + \left(\frac{1}{2\Delta y} \cdot (v_c + v_d - v_a - v_b) \right)^2 + \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\Delta y} \cdot (u_c + u_d - u_a - u_b) + \frac{1}{2\Delta x} \cdot (v_b + v_d - v_a - v_c) \right)^2 \right] \Delta x \Delta y \right) \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где NX – число узлов по оси X ;

MY – число узлов по оси Y .

Энергия продольных деформаций

$$U_t = \frac{\Delta x}{2} \sum_{i=I+1}^{K1-1} EA_{i=I+1} \left(\frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} \right)^2. \quad (9)$$

Энергия деформации изгиба плиты

$$U = \frac{\Delta x}{2} \sum_{i=I+1}^{K1-1} EJ_{i=I+1} \cdot \left(\frac{v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}}{\Delta x^2} \right)^2. \quad (10)$$

Потенциал внешней нагрузки

$$\Pi = - \sum_{i=I+1}^{K1-1} q_i(x) v_i \Delta x. \quad (11)$$

Вначале решается задача в линейной постановке. По вычисленным значениям перемещений i -той узловой точки $u_i(x)$, $v_i(y)$, используя геометрические уравнения Коши и конечно-разностные соотношения (3, 4), определяется интенсивность деформаций и напряжений в центрах ячеек (см. формулы теории упругости).

Учитывая значения напряжений и перемещений, полученные при решении задачи в первой итерации, определяется касательный или секущий модули деформации для каждой ячейки, и задача решается во втором и последующих приближениях с учетом изгибной и продольных жесткостей балочной плиты.

Нелинейный расчет заканчивается, как только разница между последующим и предыдущим приближением исследуемой функции будет соответствовать установленной точности решения задачи.

⁴ Козунова О.В. Статический анализ системы "балочная плита — нелинейно-упругое неоднородное основание" вариационно-разностным методом: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17. – Минск: БНТУ, 2017. – 168 л.

Решение задачи. Для решения задачи составлена расчетная программа Mathematica 10.0 и проведена ее числовая апробация для однослойного основания.

В качестве непросадочного основания выбираем пылевато-глинистые грунты (супесь) с коэффициентом пористости $e=0,7$ и следующими упругими постоянными: $\sigma_y = 0,25$ МПа; $\nu = 0,33$; $E = 10$ МПа.

Балочной плитой выступает железобетонная плита ленточного фундамента (ФЛ) с классом бетона по прочности С20/25 с типовым армированием. Задаем следующие характеристики плиты: длина – $l = 1,6$ м; высота – $h = 0,3$ м; модуль упругости бетона – $E_b = 2,75 \cdot 10^{10}$ Па.

На балочную плиту действует равномерно распределенная нагрузка $q(x)$, которая заменяется сосредоточенными силами $P_1 = P_3 = 100$ кН, $P_2 = 200$ кН.

Для итерационного процесса сходимости устанавливаем критерий равный 3%.

В компьютерной программе Mathematica 10.0 составляем алгоритм расчета и определяем горизонтальные и вертикальные перемещения узловых точек в линейном, а затем и в нелинейных расчетах. Результаты получаем как с учетом касательных напряжений, так и без них. Далее проводится верификация.

Ниже представлены результаты осадок основания и фундаментной плиты с учетом касательных напряжений и без них в зоне контакта. Сходимость подтверждена во второй итерации и составила 2,2%. По результатам расчета осадки упругого основания с учетом касательных напряжений снизились на 3,1% в сравнении с расчетом без учета касательных напряжений.

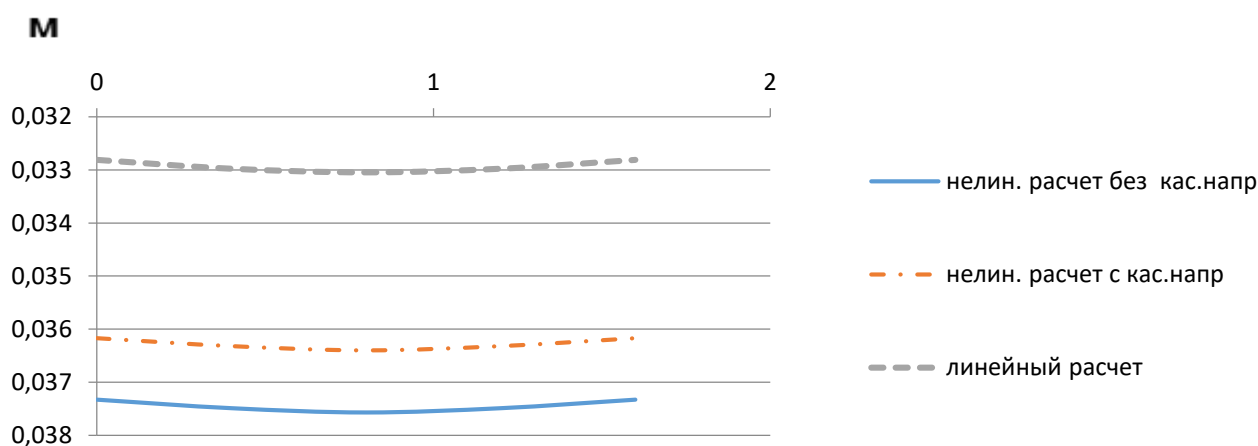


Рисунок 4. – Результаты осадок в зоне контакта

Закключение. В представленной статье авторами усложнена постановка задачи и методика расчета системы балочной плиты с однородным упругим основанием ВРМ с использованием конечно-разностных уравнений полной потенциальной энергии, что, в свою очередь, позволяет более полно исследовать эту зону биконтактного взаимодействия с учетом касательных напряжений, вычислить осадки упругого основания под плитой и определить внутренние усилия в балочной плите.

Результаты уменьшения осадок в зоне контакта (см. рисунок 4) говорят о влиянии касательных напряжений, что также подтверждается в работах И.И. Гудушаури [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Клубин П.И. Расчет балочных и круглых плит на упругом основании // Инженерный сборник. – 1952. – № 12. – С. 95–135.
2. Жемочкин Б.Н., Сеницын А.П. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1962. – 262 с.
3. Яголковский С.Н. Влияние учета сцепления упругого слоя с подстилающим основанием на результаты расчета балок // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1969. – № 4. – С. 3–5.
4. Дураев А.Е. Расчет методом конечных разностей прямоугольных плит, лежащих на грунтовой основе, модуль деформации которого изменяется с глубиной // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1971. – № 4. – С. 32–34.
5. Сеницын А.П. Расчет балок и плит на упругом основании за пределом упругости. – М.: Стройиздат, 1974. – 176 с.
6. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – 631 с.
7. Винокуров Е.Ф. Итерационный метод расчета оснований и фундаментов // Стр-во и архитектура Белоруссии. – 1970. – № 1. – С. 31–34.
8. Федоровский В.Г., Кагановская С.Е. Жесткий штамп на нелинейно-деформируемом связном основании (плоская задача) // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – № 1. – С. 41–44.
9. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности: учеб. для строит. спец. вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 400 с.
10. Гудушаури И.И. Расчет фундаментных полос на действие симметричных и антисимметричных нагрузок с учетом касательных напряжений на поверхности контакта // Известия АН СССР. Механика и машиностроение. – 1960. – № 5. – 49–57.

REFERENCES

1. Klubin, P.I. (1952). Raschet balochnykh i kruglykh plit na uprugom osnovanii. *Inzhenernyi sbornik*, (12), 95–135. (In Russ.).
2. Zhemochkin, B.N. & Sinitsyn, A.P. (1962). *Prakticheskie metody rascheta fundamentnykh balok i plit na uprugom osnovanii*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
3. Yagolkovskii, S.N. (1969). Vliyaniye ucheta stepeniya uprugogo sloya s podstilayushchim osnovaniem na rezul'taty rascheta balok. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, (4), 3–5. (In Russ.).
4. Duraev, A.E. (1971). Raschet metodom konechnykh raznostei pryamougol'nykh plit, lezhashchikh na gruntovom osnovanii, modul' deformatsii kotorogo izmenyaetsya s glubinoi. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, (4), 32–34. (In Russ.).
5. Sinitsyn, A.P. (1974). *Raschet balok i plit na uprugom osnovanii za predelom uprugosti*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
6. Gorbunov-Posadov, M.I., Malikova, T.A. & Solomin, V.I. (1984). *Raschet konstruksii na uprugom osnovanii*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
7. Vinokurov, E.F. (1970). Iteratsionnyi metod rascheta osnovanii i fundamentov. *Str-vo i arkhitektura Belorussii*, (1), 31–34. (In Russ.).
8. Fedorovskii, V.G. & Kaganovskaya, S.E. (1975). Zhestkii shtamp na nelineino-deformiruемом svyaznom osnovanii (ploskaya zadacha). *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, (1), 41–44. (In Russ.).
9. Aleksandrov, A.V. & Potapov, V.D. (2002). *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti: ucheb. dlya stroit. spets. vuzov*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
10. Gudushauri, I.I. (1960). Raschet fundamentnykh polos na deistvie simmetrichnykh i obratnosimmetrichnykh nagruzok s uchedom kasatel'nykh napryazhenii na poverkhnosti kontakta. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika i mashinostroenie*, (5), 49–57. (In Russ.).

Поступила 06.02.2024

STATIC CALCULATIONS OF A BEAM SLAB IN THE ELASTIC DIRECTION
TAKING INTO ACCOUNT SHEAR STRESSES

O. KOZUNOVA¹⁾, A. PUSENKOV²⁾

¹⁾ *Belarussian National Technical University, Minsk,*

²⁾ *KPD plant OJSC "Gomel DSK"*

In the article on static calculation, it is possible to determine the crisis-strain state (CSS) of the elastic foundation under a beam slab without taking into account tangential stresses (longitudinal deformations) in an open contact, and also leads to a new calculation method taking them into account. Numerical testing is carried out using the variation-difference method (VDM) and the results are checked to estimate the shear stresses on the stress-strain state of the elastic foundation.

Keywords: *elastic homogeneous base, beam slab, base settlements, stress-strain state, tangential stresses, contact zone.*

UDC 691.542

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-45-52

A MODELLING FRAMEWORK OF PORTLAND CEMENT HYDRATION

Ph.D in Engineering V. KRAVCHENKO
(Brest State Technical University)
vvkravchenko@g.bstu.by

Modelling the hydration process of Portland cement is a critical stage for predicting the mechanical properties of cement-based materials, since the modelling results are actually the initial data for prediction models. Incorrect modelling at this stage is high likely to lead to inadequate values of mechanical properties. The main difficulty of modelling is that cement hydration is an extremely complex process, the features of which are still not clearly understood. This determines the fact that hydration modelling is currently based on a phenomenological approach including a sufficient number of coefficients depending on experimental results.

This paper presents basic principles of hydration modelling and analyses the most widely used models to estimate the degree of cement hydration to identify their assumptions and limitations.

Keywords: portland cement, hydration kinetics, volumetric composition, modelling.

Introduction. Cement hydration is a physical and chemical process of interaction between cement clinker phases and water. The hydration process is a long time and extremely complex which is still considered from the point of hypotheses and assumptions. As a result of the hydration process, the microstructure of the cement paste with mechanical strength is formed.

The microstructure of the cement paste is composed of individual phases such as unhydrated cement, hydrate products and pores randomly distributed throughout its volume. The volumetric composition of these phases highly affects the mechanical properties of cement-based materials, such as compressive strength and Young's modulus.

Currently, a widely used approach is that the mechanical properties of cement-based materials can be predicted by a combination of the hydration model and micromechanical analysis, which originates from a representative elementary volume. The most significant part of the approach is a hydration model which evaluates the volume or volume fraction of all phases of the cement over time as a function of a degree of cement hydration. Essentially, it is a starting point for modeling the mechanical properties of cement-based materials and incorrect modelling at this stage may risk producing inadequacy results.

This paper presents the modelling framework of Portland cement hydration over time including an analysis of existing models to estimate the degree of hydration and volumetric composition of the cement paste at arbitrary time.

Hydration modelling. Actually, the cement hydration model is a complex model that integrates at least two parts:

- 1) Hydration kinetics of cement;
- 2) Predicting the volume (or volume fraction) of each phase of the cement paste over time.

Hydration kinetics of cement is described by the following evolution equations:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = f(\alpha) \text{ or } \frac{\partial r}{\partial t} = f(r), \quad (1)$$

where α – is degree of cement hydration;

r – is the radius of the cement particle;

t – is arbitrary time.

It should be pointed out that the function f may vary depending on a hydration stage.

In the first case, the rate equation refers to the overall kinetics model, in the second case to the particle kinetics model [1]. The difference between the models is that the overall kinetics model neglects the particle size distribution of cement.

The particle kinetics model is expressed in term of the rate of decrease in a radius of cement particles, in a way the degree of cement hydration is determined as:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^3, \quad (2)$$

where r_0 – is the initial radius of the cement particle.

The basic equations (1) are often applied separately for each clinker phase or each cement particle in the cement paste. In this case, the hydration degree of cement is computed as weighted mean:

$$\alpha = \frac{\sum_i \alpha_i \cdot m_i}{\sum_i m_i}, \quad (3)$$

where α_i – is the degree of the i -th phase of the cement clinker (alite, belite, aluminate, ferrite) or of the i -th cement particle;

m_i – is the weight fraction of the i -th phase of the cement clinker or of the i -th cement particle.

Predicting the volumetric composition of the cement paste can be done in a few ways:

1) Based on stoichiometry of hydration reactions [2], that makes it possible to determine the volumetric composition of all phases involved in hydration reactions. The volume of each phase is computed as a function of the molar volume ratio of the phase to the clinker phase and the hydration degree of the clinker phase. This way is highly dependent on the chemical reactions of hydration adopted for the clinker phases. One of the well-known sets of hydration reactions which accurately reflects theories on cement hydration is presented in [3].

2) Based on the Powers model [4]. It is a simple approach using experimental data to compute the volumes of unhydrated cement, hydrated solid, porosity, and chemical shrinkage as a function of the hydration degree of cement.

3) Based on the model of the hydrated cement particle [5]. The typical model of the hydrated cement particle is a decreasing cement core around which a layer of hydration products is formed. Having taken the volume ratio of unhydrated cement to hydration products, it is possible to compute the volumes of unhydrated cement, hydrated solid, and porosity. This approach is computationally expensive due to lots of calculations required to check all particle interactions. The main difficulty in such computations is the overlap of cement particles.

Hydration kinetics. As it has been mentioned, cement hydration is an extremely complex process which is still not clearly understood. That is why all the existing hydration kinetics models are phenomenological and based on experimental results. It should be understood that empirical models are designed to fit the experimental results and are not necessarily accurately describing the hydration processes from a physical point of view.

The following models are currently most widely used:

1) The Avrami model [3] describes the nucleation and growth crystals at random locations in a porous media at a constant rate:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = a_i \cdot c_i \cdot t^{c_i-1} \cdot e^{-(a_i \cdot (t-b_i)^{c_i})}, \quad (4)$$

where α_i – is the degree of hydration of the i -th phase of the cement clinker;

t – is arbitrary time, day;

a_i , b_i , and c_i – are empirical constants of the i -th phase of the cement clinker, a in $\frac{1}{day^c}$ and b in day.

2) The Bernard at al. model [6] describes the hydration process by normalized chemical affinity equations. The expression of the normalized affinity depends on the physical process at the hydration stage.

Stage 1. Dissolution of the clinker phases:

$$\tau_i \cdot \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = \frac{t_{0,i}}{\alpha_{0,i}} \cdot \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = 1. \quad (5)$$

Stage 2. Nucleation and growth-controlled hydration of the clinker phases:

$$\tau_i \cdot \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = \frac{1}{\kappa \cdot k} \cdot \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = \frac{1 - (\alpha_i - \alpha_{0,i})_+}{(-\ln(1 - (\alpha_i - \alpha_{0,i})_+))^{\frac{1}{\kappa} - 1}}. \quad (6)$$

Stage 3. Nucleation and growth:

$$\tau_i \cdot \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = \frac{r_0^2}{3 \cdot D} \cdot \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = \frac{(1 - \alpha_i)^{2/3}}{(1 - \alpha_{cr,i})^{1/3} - (1 - \alpha_i)^{1/3}}, \quad (7)$$

where τ_i – is the characteristic time associated with the reaction, h;

$t_{0,i}$ – is the duration of the induction period, h;

$\alpha_{0,i}$ – is the degree of the hydration threshold of the i -th phase of the cement clinker at the end of the induction period;

κ – is the coefficient defining the reaction order;

k – is the rate constant, 1/h;

D – is the diffusion coefficient, cm^2/h ;

r_0 – is the average initial radius of cement particles, cm;

$\alpha_{cr,i}$ – is the critical hydration degree corresponding to a critical thickness of hydration products formed around cement particles;

$(\alpha_i - \alpha_{0,i})_+$ – is the positive part of the expression.

3) The Parrot and Kiloh model [7] is similar to the previous one and describes the hydration process by empirical expressions for three stages of hydration.

Stage 1. Nucleation and growth:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = \frac{k_{1,i}}{n_{1,i}} \cdot (1 - \alpha_i) \cdot (-\ln(1 - \alpha_i))^{1-n_{1,i}}. \quad (8)$$

Stage 2. Diffusion:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = k_{2,i} \cdot \frac{(1 - \alpha_i)^{2/3}}{1 - (1 - \alpha_i)^{1/3}}. \quad (9)$$

Stage 3. Formation of hydration shells:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = k_{3,i} \cdot (1 - \alpha_i)^{n_{3,i}}, \quad (10)$$

where t – is arbitrary time, day;

$k_{1,i}$, $k_{2,i}$, and $k_{3,i}$ – are the rate constants of the i -th phase of the cement clinker, 1/day;

$n_{1,i}$ and $n_{3,i}$ – are the model parameters of the i -th phase of the cement clinker.

A lowest value of $\frac{\partial \alpha_i}{\partial t}$ is considered as the stage rate.

4) The Tomosawa model¹ describes the hydration process of a single cement particle, dividing it into three stages: a dormant stage, a phase boundary reaction stage, and a diffusion stage:

$$\frac{\partial r_{in,j}}{\partial t} = \frac{C_w \cdot \rho_w}{v \cdot \rho_c \cdot r_{in,j}^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{k_d \cdot r_{in,j}^2} + \frac{1}{De} \cdot \frac{1}{r_{in,j} \cdot r_{out,j}} + \frac{1}{k_r \cdot r_{in,j}^2}}, \quad (11)$$

where $r_{in,j}$ – is the radius of the inner unhydrated core of the j -th individual cement particle, μm ;

t – is arbitrary time, h;

ρ_w and ρ_c – is the density of water and cement respectively, m^3/kg ;

C_w – is the water concentration at the outer region of the gel;

v – is the stoichiometric ratio by mass of water to cement;

$r_{out,j}$ – is the radius of the outer hydrated products of the j -th individual cement particle, μm ;

De – is the effective diffusion coefficient, $\mu\text{m}^2/\text{h}$;

k_d – is the effective mass transfer coefficient, $\mu\text{m}/\text{h}$;

k_r – is the coefficient of reaction rate of cement, $\mu\text{m}/\text{h}$.

5) The Navi and Pignat model [8] also describes the hydration process of a single cement particle, in which the rate of reduction of the radius of the inner core is controlled by two hydration mechanisms.

Phase boundary mechanism:

$$\frac{dr_{in,j}}{dt} = -k_1. \quad (12)$$

Diffusion-controlled mechanism:

$$\frac{dr_{in,j}}{dt} = -k_2 \cdot \frac{1}{r_{out,j} - r_{in,j}}, \quad (13)$$

where k_1 and k_2 – are the rate and diffusion constants respectively, k_1 in $\mu\text{m}/\text{h}$ and k_2 in $\mu\text{m}^2/\text{h}$.

As can be clearly seen from the mathematical expressions of the presented models, all of them include a sufficient number of empirical constants needed to fit the experimental results.

The Avrami model is best suited to describe nucleation and growth reactions and is poorly suited to describe the hydration process of Portland cement as a whole. It provides with a simple kinetic model that allows good fits for kinetics for the initial stage of the hydration process up to about one day [3].

The Tomosawa and Navi–Pignat models assume that the cement particles are spheres, which is a considerable assumption. These models have high computational complexity, which increases with an increase in the number of spheres in a representative volume. Moreover, the particle radii are determined from the particle size distribution, which is approximated by a probability function (commonly the Rosin–Rammler distribution). This makes it necessary to predetermine parameters of the distribution function fitting to the fineness of cement.

The similar problem is shared by the Bernard et al. model, which depends on the average initial radius of cement particles. Furthermore, the recommended kinetic parameters of the model are strictly related to the fixed average radius of 5 μm .

The Parrot–Killoh model does not depend on the radius of cement particles, but at the same there is no nucleation growth step for belite, and no diffusion-controlled step for alite and belite when using the recommended model parameters [9].

Adjustment of hydration kinetics. The serious problem of existing hydration models is that they do not consider some physical phenomena that heavily affect the rate of the hydration process.

Three main phenomena can be distinguished: temperature, available capillary water (or relative humidity in a pore space), and the available pore space for the deposition of hydration products. In addition, the fineness factor should be introduced in overall kinetics models (the Avrami and Parrot–Killoh model).

¹ Maruyama I., Matsushita T., Noguch T. Numerical modelling of Portland cement hydration / I. Maruyama, T. Matsushita, T. Noguch // International RILEM Symposium on Concrete Modelling, Delft, 26–28 May 2008 / Delft University. – Delft, 2008. – P. 155–162.

In view of the above, the follow expression can be written to adjust for the hydration rate:

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)' = \frac{\partial \alpha}{\partial t} \cdot k_T \cdot k_w \cdot k_{por} \cdot k_{fn}, \quad (14)$$

where $\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)'$ – is the adjusted hydration rate;

k_T – is the temperature correction factor;

k_w – is the correction factor for available free (capillary) water;

k_{por} – is the correction factor for available pore space;

k_{fn} – is the fineness correction factor.

Influence of temperature on hydration kinetics is well described by the Arrhenius law [7].

The effect of available free water on hydration kinetics can be described by the following ratio:

$$k_w = \frac{V_{cap}(t)}{V_{cap}(t=0)}, \quad (15)$$

where $V_{cap}(t)$ – is the volume of capillary water in the cement paste at any arbitrary time t ;

$V_{cap}(t=0)$ – is the initial volume of water in the cement paste.

In turn, a similar ratio describes the effect of the available pore space:

$$k_{por} = \frac{SA(t)}{SA(t=0)}, \quad (16)$$

where $SA(t)$ – is the available surface area of cement particles at any arbitrary time t , m²;

$SA(t=0)$ – is the initial available surface area of cement particles, m².

The effect of cement fineness in particle kinetics models is controlled by the particle size distribution, in overall kinetics models by the following ratio:

$$k_{fn} = \frac{FN}{FN_{ref}}, \quad (17)$$

where FN – is the actual fineness of cement, kg/m²;

FN_{ref} – is the reference fineness of cement, kg/m².

The determination of the factor k_w and k_{por} is associated with certain difficulties. Firstly, the factor k_w can be determined in the two previously mentioned ways: using the Powers model or stoichiometry of hydration reactions. These ways determine the volume of capillary water in the cement paste only for sealed conditions and do not consider the moisture diffusion and evaporation into the environment. Actually, the sealed conditions can be considered if the water to cement ratio is about less 0,35, otherwise the factor k_w should determine jointly with modelling of moisture transport in the cement paste.

Secondly, the factor k_{por} can only be determined if the geometric shape and size of cement particles are known. In fact, using particle kinetics models (the Tomosawa and Navi–Pignat model) is the only way to directly determine k_{por} . In cases of using the overall kinetics models, there is no over way to determine k_{por} than by co-modelling of hydration kinetics and microstructure development of the cement paste. The advantage of this approach is a possibility of using computationally simple microstructure models, such as the Unit Cell model [4], instead of a polydisperse system of cement particles.

Modelling results. Numerical simulation of hydration kinetics models described above has been carried out. The aim of simulation is to estimate the basic hydration degree over time without the influence of correction factors, in order to clearly show significant differences of the presented models.

The recommended parameters in equations (4)–(13) were taken from the original references to the corresponding model.

Characteristics of the cement paste used in numerical simulation: cement content: 370 kg/m³; water content: 185 kg/m³; the density of cement: 3150 kg/m³.

Numerical simulation of particle hydration kinetics models was carried out for a single spherical particle in order to reduce a number of calculations. The particle radius was determined as the expected value of the Rosin-Rammler probability distribution. The parameters of the Rosin-Rammler probability distribution as a function of the cement fineness were taken from [1].

To predict the volumetric composition of the cement paste, the Powers model was taken with the parameters presented in [4].

The modeling results are presented in Figures 1–3.

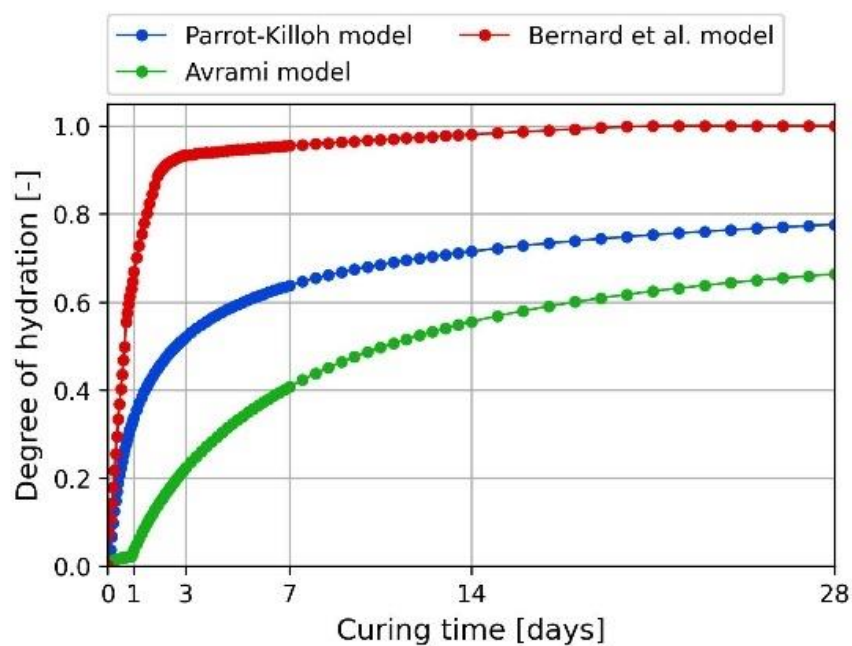
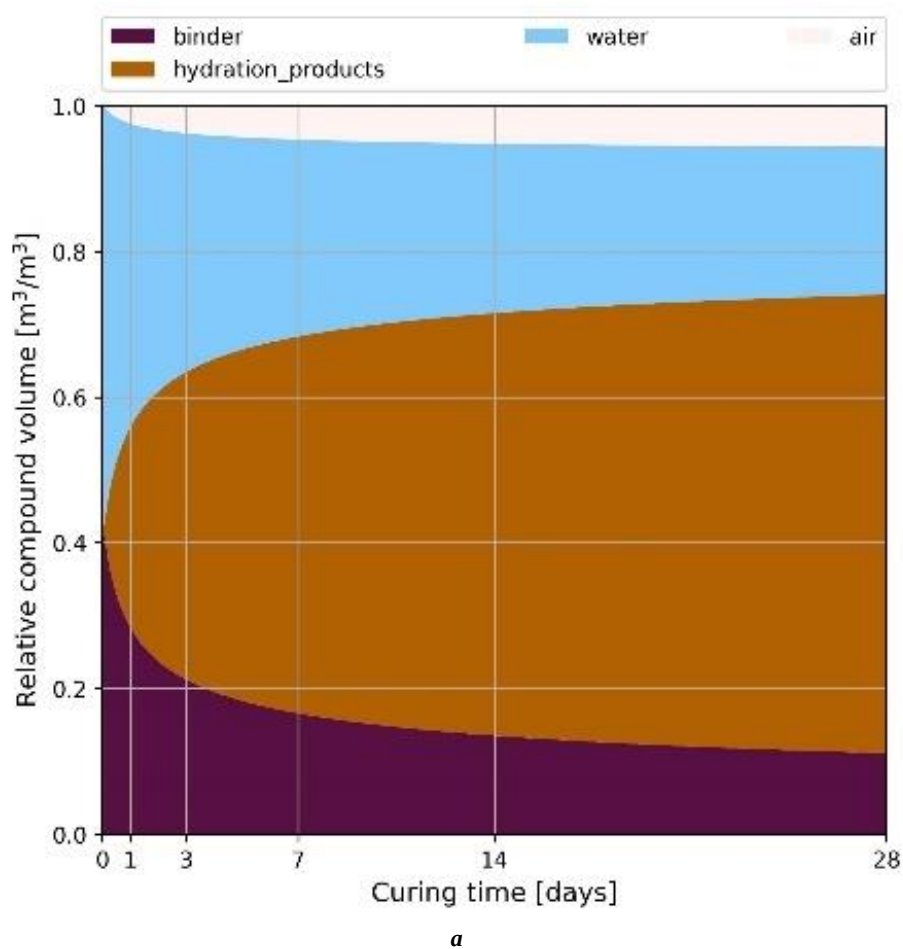


Figure 1. – The comparison of the hydration degree over time in the overall kinetics models



a – Parrot and Killoh model

Figure 2. – The comparison of the volumetric composition of the cement paste in the overall kinetics models (beginning)

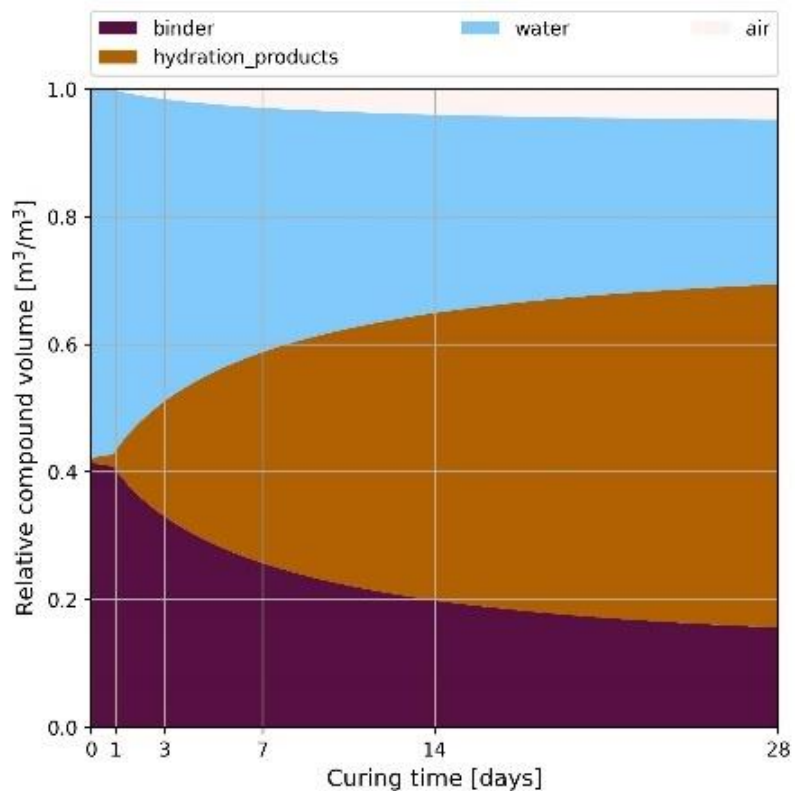
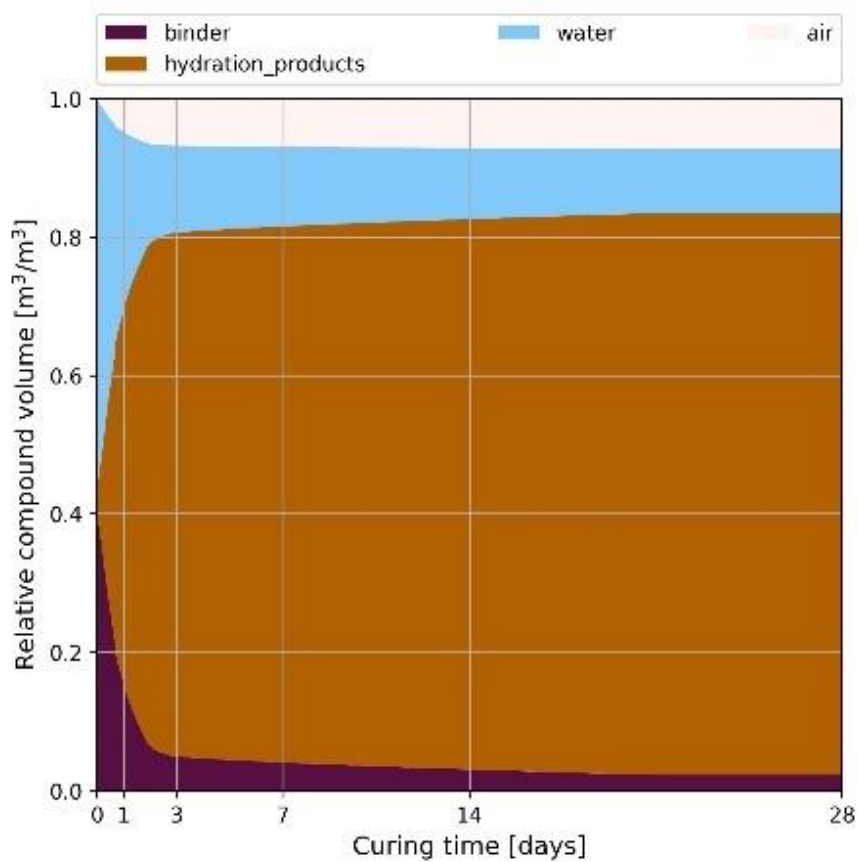
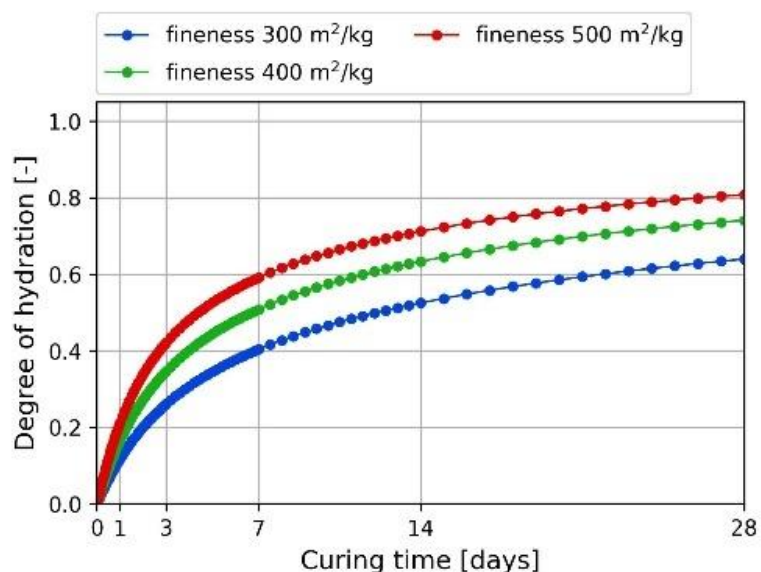
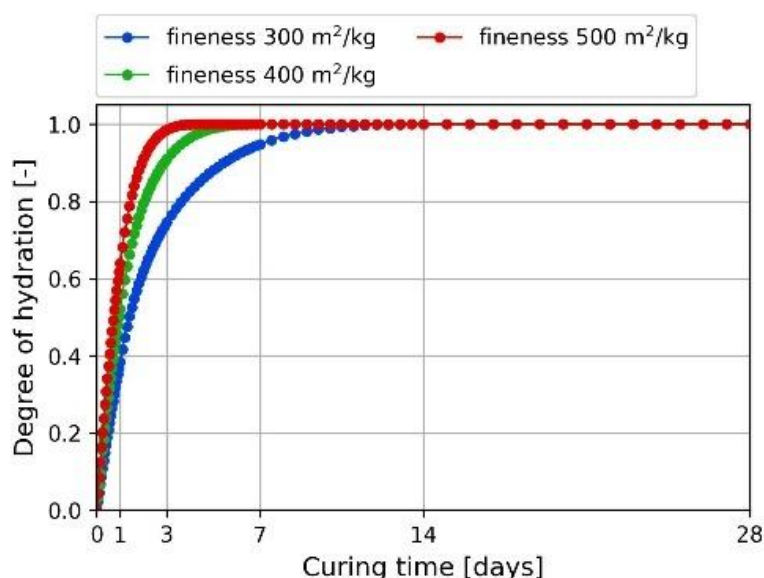
*b**c**b* – Avrami model; *c* – Bernard et al. model

Figure 2. – The comparison of the volumetric composition of the cement paste in the overall kinetics models (ending)



a



b

a – Tomosawa model; b – Navi-Pignat model

Figure 3. – The comparison of the hydration degree over time in the particle kinetics models

Conclusion. We can make such conclusions.

1. Cement hydration is an extremely complex process, so there is no generally accepted model for predicting it.
2. The existing hydration kinetics models are phenomenological and include a sufficient number of coefficients depending on experimental results. It should be attentive to their values, since changing even one value can significantly affect the final result.
3. The overall hydration kinetics models are computational simple and the most suitable for determining the volumetric composition of the cement paste. The particle kinetic hydration kinetics models are computational complexity and based on a significant assumption about a spherical shape of cement particles. They are most suitable for determining the pore size distribution of the cement paste.
4. The use of overall hydration kinetics models is highly recommended by co-modelling with models of microstructure development of the cement paste. This makes it possible to take into account the parameters of the porous space, producing more accurate values of the hydration degree. Moreover, it is a very flexible approach making the modelling of cement hydration more realistic by using not only spherical models of microstructure development, but also discrete ones with random morphologies.

REFERENCES

1. Van Breugel, K. (1997). *Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials*. Second edition. Delft: Delft University Press.
2. Pichler, C., Lackner, R. & Mang, H.A. (2007). A multiscale micromechanics model for the autogenous-shrinkage deformation of early-age cement-based materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 74(1–2), 34–58. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2006.01.034.
3. Tennis, P.D. & Jennings, H.M. (2000). A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30(6), 855–863. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00257-X.
4. Jensen, O.M. & Hansen, P.F. (2001). Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background. *Cement and Concrete Research*, 31(4), 221–233. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00463-X.
5. Park, K.B., Noguchi, T. & Plawsky, J. (2005). Modelling of hydration reactions using neural networks to predict the average properties of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1676–1684. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.08.004.
6. Bernard, O., Ulm, F.J. & Lemarchand, E. (2003). A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1293–1309. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00039-5.
7. Lothenbach, B., Matschei, T., Möschner, G. & Glasser, F.P. (2008). Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 38(1), 1–18. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.08.017.
8. Navi, P. & Pignat, C. (1996). Simulation of cement hydration and the connectivity of the capillary pore space. *Advanced Cement Based Materials*, 4(2), 58–67. DOI: 10.1016/S1065-7355(96)90052-8.
9. Lavergne, F., Ben Fraj, A., Bayane, I. & Barthélémy, J.F. (2018). Estimating the mechanical properties of hydrating blended cementitious materials: An investigation based on micromechanics. *Cement and Concrete Research*, 104, 37–60. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.10.018.

Поступила 28.11.2023

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАТАЦИИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

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

Моделирование процесса гидратации портландцемента является ключевым этапом прогнозирования механических свойств материалов на основе цемента, поскольку результаты моделирования фактически являются исходными данными для моделей прогнозирования. Некорректное моделирование на этом этапе с высокой вероятностью приведет к неадекватным значениям механических свойств. Основная трудность моделирования состоит в том, что гидратация цемента представляет собой чрезвычайно сложный процесс, который до сих пор до конца не изучен. Это обуславливает тот факт, что моделирование гидратации в настоящее время базируется на феноменологическом подходе, зависящем от коэффициентов, определяемых из экспериментальных данных.

В данной статье представлены основные принципы моделирования гидратации портландцемента и проанализированы наиболее широко используемые модели для оценки степени гидратации цемента, чтобы установить их допущения и ограничения.

Ключевые слова: портландцемент, кинетика гидратации, объемный состав, моделирование.

УДК 628.925:004.925.8

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-53-58

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ,
ИНСОЛЯЦИИ И СОЛНЦЕЗАЩИТЫ**

канд. пед. наук И.А. ОДЕНБАХ
(Оренбургский государственный университет)

В статье описывается численное моделирование геометрических параметров решеток, угловых и временных характеристик светопропускания и пропускания солнечной энергии, оптимизации естественного освещения, инсоляции и солнцезащиты, а также притока тепла от солнечной радиации для оценки влияния на функционирование систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВиК). Представлены эксклюзивные особенности угловых фильтров, включая уникальную формулу для вычисления смещения между входными и выходными решетками при характеристическом угле фильтра и произвольном угле падения света. В удобном табличном формате приведены расчетные формулы и параметры пропускания света для различных границ диапазонов в зависимости от соотношений ширины полос.

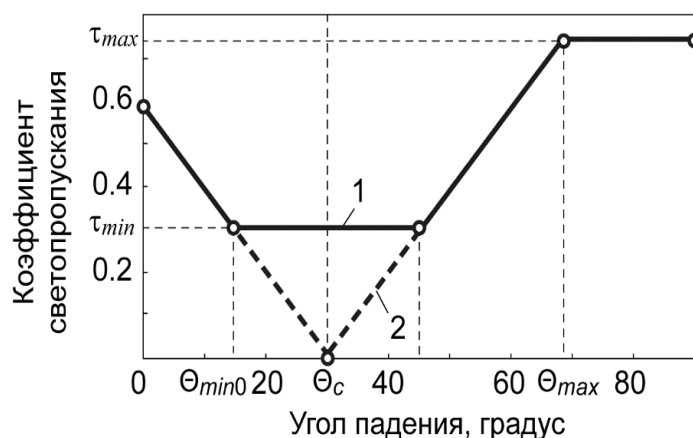
Основным преимуществом смарт-окон, оборудованных такими фильтрами, является возможность изменения угла наклона решеток, что выделяет их среди прочих солнцезащитных устройств, таких как жалюзи, своей универсальностью. Это позволяет обеспечить оптимальную защиту от солнечного света при любом азимуте окна, что наглядно демонстрируется на примере схемы смарт-окон с различными азимутами для здания с круглым фасадом.

Указывается на целесообразность использования смарт-окон, имеющих решетчатые фильтры для зданий с непрямыми фасадами. Это позволит сделать более комфортным естественное освещение в помещениях, регулировать инсоляцию и защищать помещения от попадания прямых лучей солнца.

Ключевые слова: естественное освещение, инсоляция, солнцезащита, смарт-окна, решеточный фильтр.

Введение. В исследовании [1] были подробно рассмотрены уникальные аспекты пропускания света через смарт-окна с инновационной угловой селективной фильтрацией солнечного излучения. Нами был представлен метод, позволяющий проводить как теоретические, так и практические расчеты характеристик пропускания света через такие окна, учитывая разнообразные геометрические параметры оптического фильтра. Данная методика создана для того, чтобы сократить уровень проникновения света в конкретный момент или за определенный период, принимая во внимание распределение ширины линий на каждой из сеток фильтра.

Угловые характеристики фильтра. Для теоретической характеристики углового значения фильтра в его пропускании света необходимо проследить различные стадии: через минимум к максимуму пропускания света (что отражено на рисунке 1 в первой линии). Диапазон значений пропускания света показывает тот временной период, в рамках которого для фильтра характерно наименьшее пропускание света.



- 1 – с минимальным коэффициентом светопропускания в интервале углов падения;
2 – с минимальным коэффициентом светопропускания при одном угле падения

Рисунок 1. – Угловые характеристики фильтра

На представленном выше графике (см. рисунок 1) вторая линия является примером того, как складывается идеальная ситуация, при которой свет проходит через фильтр в строго обозначенное время, которое соответствует углу облучения. В таком случае пропускные возможности фильтра почти сводятся к нулю. Пропускание света фильтром зависит от угла облучения и имеет симметрию вокруг угла Θ_c .

Для достижения минимального пропускания света через окно в определенный момент дня устанавливается определенное начальное время $t_{\min 0}$ для этого временного интервала. Посредством применения соответствующих математических уравнений определяются координаты точек x и y , в которых солнечный луч падает на входную поверхность фильтра, оставляя свой отпечаток на его выходной стороне.

Формулы, которые применяются для тройного остекления, аналогичны формулам, используемым для двойного остекления. Это связано с тем, что решетки фильтра расположены на внутренней поверхности одного и того же слоя стекла.

Также на рисунке 1 представлено нахождение проекции $\Theta_{\min 0}$ угла падения для определенного времени $t_{\min 0}$ на плоскость, которая перпендикулярна полосам решеток фильтра.

Максимально возможное значение критерия прохождения света через окно варьируется в пределах от 0,30 до 0,88 для одинарного остекления, от 0,30 до 0,80 для двойного остекления и от 0,30 до 0,72 для тройного остекления. Также обозначается определенный временной период $t_{\max}$, когда показатель пропускания света достигает своего наибольшего значения.

В отношении такого времени найдем координаты x , y , вычислим проекцию угла падения на плоскость, которая является перпендикулярной полосам решеток фильтра.

Показатель пропускания света при одинарном остеклении принимается за основу в качестве отражения (через уравнение Френеля), а также в качестве поглощения (на основе закона Бугера-Ламберта). При расчете используются особые формулы. Минимальный и максимальный теоретические показатели пропускания находятся на основе аналогичных формул при задействовании значений $\Theta_{\min 0}$ и $\Theta_{\max}$, а также $\tau_{\min}$ и $\tau_{\max}$.

При формировании линий 1 и 2 на диаграмме (см. рисунок 1) во внимание принимается симметричность прохождения света по отношению к углу фильтра.

Для того чтобы найти значение критерия пропускания света под различным углом, важно определить смещение следов, оставленных на решетках при входе и выходе (Δ):

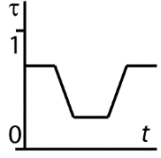
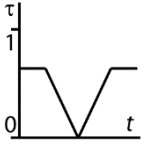
$$\Delta = \sqrt{x_{\min}^2 + y_{\min}^2} \cdot \cos(\gamma - \arctan \frac{x_{\min}}{|y_{\min}|}) - \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos(\gamma - \arctan \frac{x}{|y|}). \quad (1)$$

Расположенная далее таблица 1 содержит необходимые для расчетов формулы и временные периоды, которые соответствуют углам направленности лучей солнца в разные периоды дня.

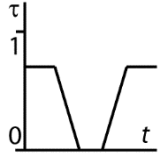
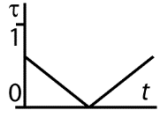
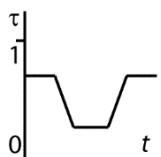
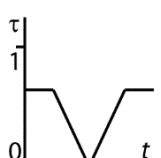
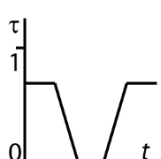
$\tau = f(t)$ отражает зависимость показателя пропускания света и времени суток. Данная теоретическая характеристика изменяется в зависимости от показателей отражения и поглощения.

На основе этого показателя определяется зависимость фактического показателя пропускания света от времени дня, что обозначается как $\tau_r = f(t)$.

Таблица 1. – Диапазоны, формулы и данные о пропускании света с учетом соотношения ширины полос

Соотношение ширины полос	Границы диапазона	Расчетная формула	Характеристика светопропускания
1	2	3	4
$c_2 < c_4; c_2 < c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta \leq -0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3$ $-0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3 \leq \Delta \leq -0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 < \Delta < 0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3$ $0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3 - c_2}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$	
$c_2 < c_4; c_2 = c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta < -0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3$ $-0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3 \leq \Delta \leq 0$ $0 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3$ $0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$	

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
$c_2 < c_4; c_2 > c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta < -0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3$ $-0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 < \Delta < -0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3$ $0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = 0$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$	
$c_2 = c_4; c_2 = c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta \leq 0$ $0 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{ \Delta }{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta }{c_1 + c_2}$	
$c_2 > c_4; c_2 < c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta < -0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq -0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 < \Delta < 0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3 - c_2}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$	
$c_2 > c_4; c_2 = c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta < -0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0$ $0 < \Delta < 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$	$\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$	
$c_2 > c_4; c_2 > c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta < -0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 < \Delta < -0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = 0$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$	

Рассчитанные коэффициенты направленного пропускания света отображают изменение прямой солнечной радиации, проникающей в помещение. Отраженное и рассеянное излучение, проходящее через фильтрующие решетки, способствует повышению комфорта дневного освещения.

Научные исследования [2; 3] подтверждают преимущества смарт-окон с фильтрами по сравнению с жалюзи, обеспечивая оптимальную солнцезащиту при любом азимуте окна благодаря наличию различных углов наклона решеток. Смарт-окна с фильтрами способны эффективно блокировать прямой солнечный свет в более широком диапазоне углов падения, что делает их более удобными и эффективными для мест с длительным пребыванием людей в светлое время суток, таких как учебные, офисные и промышленные помещения.

Дополнительные исследования¹ показывают, что влияние дифракции на светопропускание решетчатого фильтра в обычных условиях эксплуатации можно считать незначительным. Однако при углах падения более 70°

¹ Zakirullin R., Odenbakh I. Diffraction of Sunlight by Grating Optical Filters in Smart Windows // Advanced Photonics Congress (IPR, Networks, NOMA, PVLED, SPPCom): proceedings of the Conference, OSA, 26–30 July 2021. – P. 1–2.

отражательная способность возрастает, что может усилить дифракционный эффект. Тем не менее, даже при таких углах фильтры эффективно снижают прямую солнечную радиацию.

Было проведено численное моделирование [4], направленное на оптимизацию естественного освещения и инсоляции в зданиях с криволинейными фасадами. Моделирование базируется на оптимизированных параметрах для различных географических регионов, что позволяет определить оптимальные угловые и временные характеристики пропускания света и оценить комфортность микроклимата и экономическую эффективность вентиляции и кондиционирования воздуха.

Схема смарт-окон. Схема на рисунке 2 дает возможность наглядно представить характеристики фильтров для смарт-окон при наличии у зданий круглых фасадов. Данные азимутов принимаются по 135° , 180° и 225° . Несмотря на то, что окна с двойным стеклом имеют одинаковые размеры, используемые для них решетчатые фильтры должны отличаться по своим характеристикам. Таким образом, можно добиться сокращения проникновения света, если солнечные лучи расположены в плоскостях, которые являются перпендикулярными окнам.

Расчеты осуществлялись для Оренбурга по состоянию на 15.06.2020, когда своего наибольшего значения достиг показатель солнечной радиации. Выяснилось, что предпочтительным значением угла наклона для решеток фильтра является 36° и 0° [5].

Расчетная схема смарт-окон представлена на рисунке 2.

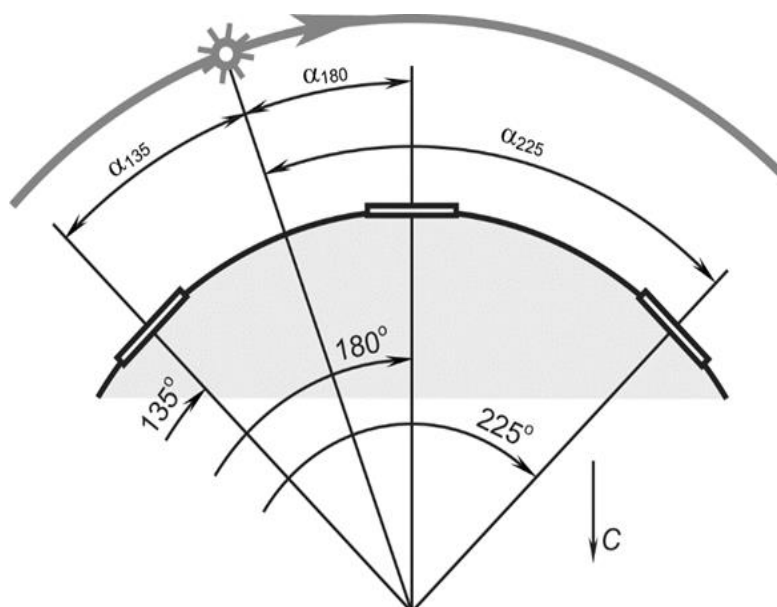


Рисунок 2. – Расчетная схема смарт-окон с разными азимутами для здания с круглым фасадом

Для того чтобы сократить возможность попадания света через окна, азимуты которых равны 135° , 180° и 225° при их непосредственном совпадении с азимутами солнца, на основе специальной избранной формулы был произведен расчет оптимального значения углов. Ширины полос фильтрации были рассчитаны с учетом этих формул и заданных минимальных и максимальных теоретических значений пропускания света $\tau_{\min} = 0$ и $\tau_{\max} = 0,5$. Чтобы обеспечить более ясное сравнение результатов, было проведено численное моделирование с учетом одинаковых ширин полос решеток фильтра для трех типов окон. Это было достигнуто путем установки соответствующих значений среднего угла падения. В результате расчетов были получены следующие данные:

- для азимута 135° $\Theta_c = 49,3872^\circ$, $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ мм при $\Theta_{av} = 40,4872^\circ$;
- для азимута 180° $\Theta_c = 61,55^\circ$, $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ мм при $\Theta_{av} = 56,88485^\circ$;
- для азимута 225° $\Theta_c = 49,4084^\circ$, $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ мм при $\Theta_c = 40,51605^\circ$.

Для вычисления теоретических временных характеристик смарт-окон использовались данные о высоте расположения и азимутах солнца, полученные с помощью онлайн-калькулятора на ресурсе <https://planetcalc.ru/320/>. Информация была собрана с интервалом в 30 минут в течение солнечного дня 15 июня 2020 года, начиная с 06:30 и заканчивая 20:30. Для анализа были выбраны временные точки 11:36, 13:20 и 15:04, когда азимуты солнца совпадали с азимутами окон.

В последующем на основе необходимых формул будет установлен коэффициент пропускания света, применительно к термостроному материалу, имеющему систему, встроенную в тонкую пленку. Исходя из произведенных расчетов, было установлено, что показатели пропускания света и энергии солнца при окрашивании являются равными 0,045 [6]. На основе данной формулы также были найдены коэффициенты пропускания смарт-окна, имеющего по всей площади покрытие в виде термостроного материала.

Данные о пропускании света смарт-окон. На расположенной ниже диаграмме (рисунок 3) содержатся в наглядном виде сведения о прохождении света через смарт-окна, которые имеют решетчатые фильтры (что обозначено верхними линиями на диаграмме), скорректированные версии профилей (средние линии диаграммы), данные обычных смарт-окон (нижние линии диаграммы). Также обозначены те периоды, при которых азимуты солнца и окон являются одинаковыми. За основу были приняты три различных азимута окон: 135° (с 06:30 до 14:30), 180° (с 10:00 до 16:30) и 225° (с 12:30 до 20:30).

Профили прохождения света через смарт-окна отражают минимумы в определенные периоды, когда азимуты окон и солнца совпадают. Следовательно, для окон зданий, имеющих криволинейный фасад, можно установить наиболее эффективный угол наклона решеток, а также подобрать материал, который в окрашенном виде имеет необходимые показатели пропускания света. Это позволит добиться в определенные периоды времени минимального прохождения света через окно.

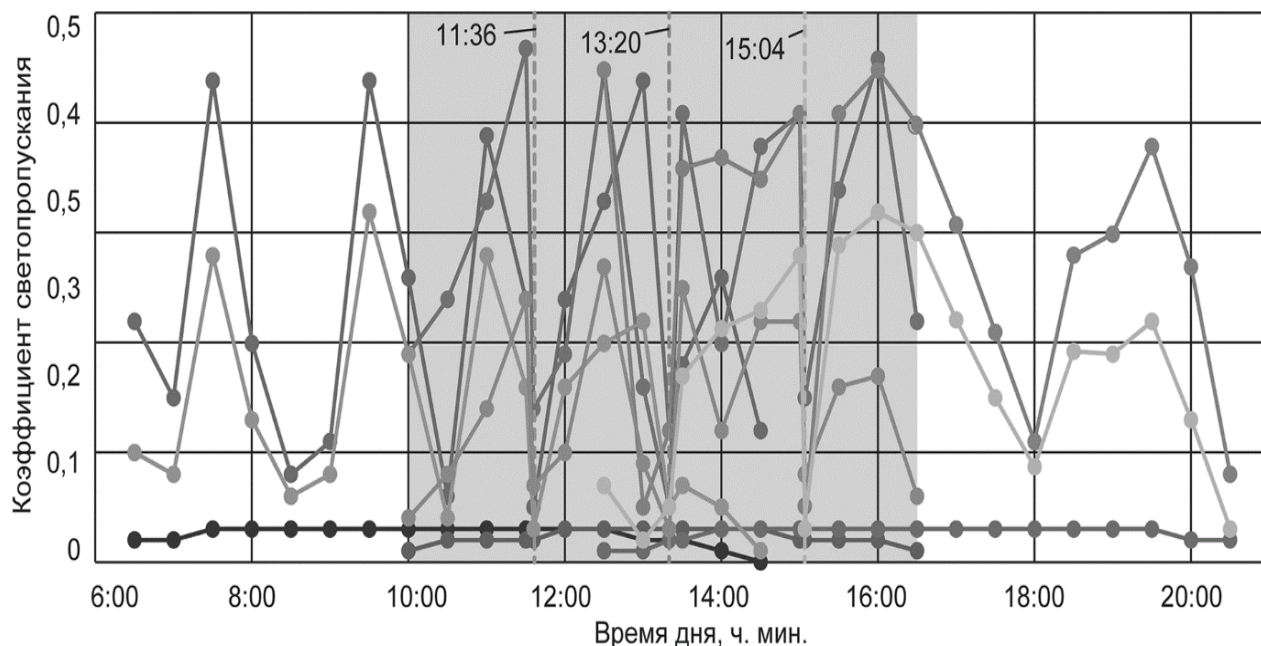


Рисунок 3. – Временные характеристики светопропускания смарт-окон с разными азимутами

На рисунке 3 видно, что решетчатые фильтры содействуют сокращению прохождения света в определенные периоды времени. В те периоды, когда пропускание света не соответствует заданным параметрам, смарт-материалы могут активироваться для перехода на обесцвечивание.

Закключение. На рисунке 3 можно увидеть, что показатели прохождения света для смарт-окна являются неизменными на протяжении всего дня. Решетчатые смарт-окна имеют приоритет перед обычными окнами, так как позволяют под определенным углом регулировать пропускание света, приспосабливать окна к постоянному движению солнца и изменению освещения. Применение данного типа смарт-окон дает возможность сделать более комфортным освещение в помещении, прямой свет такими окнами будет блокироваться, в помещение попадет только рассеянный свет.

При отсутствии штор, жалюзи и аналогичных занавесей повышаются эргономичные и экологические показатели окон, они выглядят гораздо более эстетично. Задействование решетчатых фильтров в зданиях с криволинейными фасадами позволяет сохранить параметры прохождения света, наиболее приемлемые для различных азимутов.

По итогам проведенного исследования было установлено, что смарт-окна, снабженные решетчатыми фильтрами, необходимо задействовать в зданиях, имеющих криволинейные фасады. Это позволит сделать более комфортным естественное освещение в помещениях здания, приспособить пропускание солнечного света через окна к изменению положения солнца по отношению к данным окнам². Исследование показало, что можно провести подсчет оптимальных характеристик фильтров для смарт-окон и сократить проходящий через них солнечный свет в определенный период времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Характеристика светопропускания смарт-окон с угловой селективной фильтрацией солнечного излучения // Изв. вузов. Стр.-во. – 2019. – № 4. – С. 106–113.

² Zakirullin R.S., Odenbakh I.A. Simulation of daylight in buildings with curved facades for rational use of solar energy // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Atlanta, GA, US, 9–13 October 2022. – Vol. 979, № 1. – P. 1–6.

2. Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Смарт-окно с решеточным оптическим фильтром для динамического контроля дневного освещения // Изв. вузов. Стр-во. – 2019. – № 12. – С. 96–107.
3. Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Динамический контроль естественного освещения с помощью смарт-окна с решеточным оптическим фильтром // Светотехника. – 2021. – № 3. – С. 47–51.
4. Оденбах И.А., Закируллин Р.С. Оптимизация естественного освещения и инсоляции зданий с криволинейными фасадами // Academia. Архитектура и стр-во. – 2021. – № 2. – С. 111–116.
5. Zakirullin R.S. A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation // J. Sol. Energy Eng. – 2020. – Vol. 142, № 1. DOI: 10.1115/1.4044059.
6. Seeboth A., Ruhmann R., Mühling O. Thermotropic and thermochromic polymer based materials for adaptive solar control // Materials. – 2010. – № 3(12). – P. 5143–5168.

REFERENCES

1. Zakirullin, R.S. & Odenbakh, I.A. (2019). Kharakteristika svetopropuskaniya smart-okon s uglovoi selektivnoi fil'tratsiei solnechnogo izlucheniya [Light transmission characteristics of smart windows with angular selective filtering of solar radiation]. *Izv. vuzov. Str-vo [News of higher educational institutions. Construction]*, (4), 106–113. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-724-4-106-113. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Zakirullin, R.S. & Odenbakh, I.A. (2019). Smart-okno s reshetochnym opticheskim fil'trom dlya dinamicheskogo kontrolya dnevnogo osveshcheniya [Smart window with grating optical filter for dynamic control of daylighting]. *Izv. vuzov. Str-vo [News of higher educational institutions. Construction]*, (12), 96–107. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-732-12-96-107. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Zakirullin, R.S. & Odenbakh, I.A. (2021). Dinamicheskii kontrol' estestvennogo osveshcheniya s pomoshch'yu smart-okna s reshetochnym opticheskim fil'trom [Daylighting dynamic control by smart window with grating optical filter]. *Svetotekhnika [Light & Engineering]*, (3), 47–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Odenbakh, I.A. & Zakirullin, R.S. (2021). Optimizatsiya estestvennogo osveshcheniya i insolyatsii zdaniy s krivolineinymi fasadami [Optimization of natural lighting and insolation in buildings with curved facades]. *Academia. Arkhitektura i str-vo [Academia. Architecture and construction]*, (2), 111–116. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-111-116. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Zakirullin, R.S. (2020). A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation. *J. Sol. Energy Eng.*, 142(1). DOI: 10.1115/1.4044059.
6. Seeboth, A., Ruhmann, R. & Mühling, O. (2010). Thermotropic and thermo-chromic polymer-based materials for adaptive solar control. *Materials*, 3(12), 5143–5168. DOI: 10.3390/ma3125143.

Поступила 10.11.2023

NUMERICAL MODELING OF NATURAL LIGHTING, INSOLATION AND SUN PROTECTION

I. ODENBAKH
(Orenburg State University)

The article describes numerical modeling of geometric parameters of gratings, angular and temporal characteristics of light transmission and transmission of solar energy, optimization of natural lighting, insolation and sun protection, as well as heat inflow from solar radiation to assess the impact on the functioning of heating, ventilation and air conditioning systems (HVC). The angular characteristics of the filter are presented, a formula for determining the shift between the traces of the input on the plane of the output lattice at the characteristic angle of the filter and an arbitrary angle of incidence. In tabular, calculation formulas and light transmission characteristics are indicated for certain range boundaries, depending on the ratio of band widths.

The advantages of a smart window with a filter are also justified due to the possibility of any angle of inclination of the grilles compared to blinds, which cannot provide optimal sun protection at any azimuth of the window, and the figure shows a diagram of smart windows with different azimuths for a building with a round facade.

The expediency of using smart windows with grid filters in buildings with curved facades to increase the comfort of natural lighting and insolation, protection from direct sunlight is substantiated.

Keywords: natural lighting, insolation, sun protection, smart windows, grid filter.

УДК 347.787+904(476)

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-59-66

**ИТОГИ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТЕН ДОМА ПО УЛ. НИЖНЕ-ПОКРОВСКАЯ, 20
(КЕЛЕЙНЫЙ КОРПУС БЫВШЕГО ФРАНЦИСКАНСКОГО МОНАСТЫРЯ) В Г. ПОЛОЦКЕ****А.А. СОЛОВЬЁВ***(Национальный Полоцкий историко-культурный музей-заповедник)*

В статье представлены итоги зондажных работ на стенах келейного корпуса бывшего францисканского монастыря. Они позволили выявить ряд разновременных перестроек и остатки конструкций, элементов первоначальной планировки и интерьеров, которая сегодня полностью утрачена и частично известна только по инвентарным описаниям 1818, 1823 и 1832 годов. Также обнаружены следы коренных перепланировок изучаемого здания, производившихся в позднейшее время под нужды различных учреждений, периодически занимавших постройку. В частности, особый интерес представляют ниши с частично сохранившимися деревянными полками и покрасками XVIII – первой трети XIX вв., следы перестроек в восточной части здания. Уникальной находкой стал сохранившийся в составе здания фрагмент восточного фасада костёла, считавшегося полностью утраченным на сегодня. Таким образом, была выяснена последовательность возведения основных зданий монастыря.

Ключевые слова: Полоцк, францисканский монастырь, зондажи, стена костёла, руст, ниши.

Введение. Полоцкий францисканский монастырь был основан в период между 1628–1648 гг. До постройки каменного здания друг друга сменили два деревянных костёла. Пожар 1762 г. положил начало строительству каменного ансамбля, частично сохранившегося и сегодня¹. Каменный храм возводился с 1763 по 1775 гг. Корпус монастыря по некоторым данным был построен в начале XVIII в. [1, с. 453; 2, с. 202], по другим – к 1778 г., и на планах Полоцка последней четверти XVIII в. костёл и корпус уже присутствуют [3, с. 228, 229, 382]. Инвентари 1818, 1823, 1832 гг. указывают на расположение ряда келий по южной стороне здания, объединяющий их коридор, обращённый окнами на улицу, наличие сводов в обоих этажах здания², а также расположение главного входа в здание (кляштор) со стороны костёла. Все печи келий были выложены зелёными изразцами, часть из них растапливалась со стороны коридора. Полы жилых помещений были деревянными, в коридорах – кирпичными, лестница и уборные располагались в восточной части здания. Кровля корпуса была частично гонтовой, частично черепичной. Снаружи корпус был не оштукатурен³. После закрытия монастыря в 1832 г., в 1838 г. костёл передали под Ново-Покровскую церковь. Позже здание стало сползать в сторону Западной Двины и трескаться, по причине чего весь монастырь продали в 1860 г. на слом [4, с. 11]. На 1862 г. монастырский комплекс указан полностью сломанным⁴. На сегодня сохранился только корпус (кляштор). План здания 1869 г. указывает на ряд больших перестроек, проведенных в 60-х гг. XIX в., и не совпадает с описаниями Инвентарей 1818, 1823, 1832 гг.⁵

Существующая планировка бывшего монастырского корпуса не имеет ничего общего ни с первоначальной планировкой, ни с планом 1869 г., поскольку сегодня от первоначального здания, по сути, уцелел лишь периметр внешних стен [5, с. 36: рис. 3]. В корпусе сохранились подъезды с лестницами из наборных цементных ступенек, выполненными по балкам из швеллеров, с перилами из прокатной стали на заклёпках и ковке. Лестничные перекрытия и площадки выполнены по сводам на металлических балках. Данные конструкции в значительной мере характерны для памятников архитектуры конца XIX – начала XX вв. [6, с. 91–94]. Сегодня из деревянных элементов XIX – начала XX вв. уцелели тёсанные деревянные балки перекрытий и некоторые оконные рамы. Перестройки второй половины XX в. касались переноса деревянных перегородок, перестилки полов, замены оконных рам, закладки и пробивания дверных и оконных проёмов, устройства коридора через весь корпус и его позднейшего соединения с пристройкой, стоявшей на месте костёла (рисунок 1).

После передачи бывшего монастырского корпуса НПИКМЗ для устройства в нём музея археологии, возникла необходимость тщательного изучения здания, выявления скрытых дефектов и ценных архитектурно-исторических объектов. С этой целью, по заданию ООО «Научно-проектный центр "Рестабилис"» снаружи и внутри

¹ Авчинникова Ю.А. Объекты городской застройки и топографии Полоцка конца XIV–XVIII вв. по материалам «Археологического сборника документов, относящихся к истории Северо-Западной Руси» // Матэрыялы міжнароднай навукова-практычнай канферэнцыі: (па выніках навукова-даследчай работы супрааўнікаў Нацыянальнага Полацкага гісторыка-культурнага запаведніка ў 2015 г.) / уклад. Т.У. Явіч. – Мінск: Медысонт, 2018. – С. 12.

² Глиник В.В. Материальная недвижимая историко-культурная ценность «здание бывшего кляштора францисканцев» (XVIII в.) по ул. Нижне-Покровской, 20 в г. Полоцке. Объект № 14.22 «реставрация с реконструкцией бывшего жилого корпуса монастыря францисканцев по ул. Нижне-Покровской, 20 в г. Полоцке (историко-культурная ценность категории «2», XVIII в.) с приспособлением под Музей археологии г. Полоцка». Комплексные научные изыскания. – Кн. 2. Историческая справка / ООО «Научно-проектный центр «РЕСТАБИЛИС». – Минск, 2022. – С. 5–9.

³ Там же. – С. 9.

⁴ Памятная книжка Витебской губернии на 1864 г. / под ред. А.М. Сементовского. – СПб.: Тип. К. Вульфа, 1864. – С. 165.

⁵ См. сноску 2.



Рисунок 1. – План бывшего францисканского монастыря с обозначением примерной первоначальной планировки корпуса, кладок и стен костёла в шурфах и на стыке зданий

имели вынос за плоскость гладкой стены на 15–17 см (половина кирпича XVIII в. со штукатуркой с учётом их одинаковой ширины (1,15 м)), гладкое прясло стены между ними составляло около 1,6 м, верхние русты в 3 ряда кирпича были уже нижних (4 ряда кирпича). Над ними на высоте около 2,45 м от уровня существующего чистого пола прослежен срубленный карниз в 4 ряда кирпича, выше которого на выступах стены (лопатках?) руст отсутствовал.

Зондаж в кладке севернее южного рустового выступа (лопатки?) показал, что в гладком прясле стены имелся дополнительный выступ на расстоянии 0,17 м от него. На его основе был реконструирован выявленный ранее рустовый выступ на северо-восточном углу костёла и прясло стены между ними шириной около 1,2 м (рисунки 2 и 3: 2).

Наличие выступов подтвердили и зондажи на уровне второго этажа. Выступ (лопатка?) над срубленным карнизом костёла имеет ширину 0,95 м, которая говорит о том, что данный фрагмент стены относится к северо-восточной колокольне храма, обращённого фасадом к ул. Нижне-Покровской.

Расчистки в северной части **западной стены** (см. рисунки 2 и 3: 2) над зондажом с рустовым углом выявила продолжение угла костёла. Рустовую часть стены завершал карниз толщиной в 4 ряда из обычного тёсаного кирпича. Расчистка заполнения стыка между кладками стен костёла и корпуса, который разошёлся при сползании обоих зданий в сторону Западной Двины, обнаружила частично сохранившиеся вытянутые штукатурные профили костёла, но их полноценный отпечаток имеется на растворе примыкающего выступа западной стены корпуса. Дальнейшие расчистки мусора в щели между конструкциями показали, что угол костёла по форме представлял собой четверть круга. Расчистки вокруг выступов выявили, что юго-восточный угол колокольни костёла, как и северо-восточный, был оформлен четвертью круга, к которому вёл двухступенчатый уступ.

Разборка части закладки в юго-западном углу под потолком **помещения 6** второго этажа показала, что между ней и стеной костёла сохранилась забивка утеплителем в виде конского волоса и щепок, среди которых была найдена стеклянная бусина. Судя по всему, она сохранилась со времени возведения корпуса в последней четверти XVIII в. На выступе (лопатке) костёла на высоте 1,87 м от существующего чистого пола второго этажа видна кладка вертикально поставленным кирпичом в 1 ряд; там, возможно, замурован клин металлического тяжа; ширина прясла стены между лопатками около 1,6 м. В ходе пристройки келейного корпуса между двумя выступами (лопатками) колокольни были устроены ниши с лучковыми арками.

здания велись зондажные работы⁶. С учётом сохранившихся сегодня капитальных стен корпус был разделён на ряд условных помещений: «Восточная лестница», «Центральная лестница», «Помещения 1, 2, 3, 4, 5, 6» (без учёта деревянных перегородок) и «Пристройка» (стена кляштора). Проведение зондажных работ показало, что каждое из помещений 2, 3, 5, 6 включает в себя остатки двух первоначальных келий (нами условно названы «западная» и «восточная кельи») и фрагмент коридора (рисунок 2). Примененная разбивка облегчает привязку выявляемых артефактов к конструкциям и позволяет последовательно исследовать здание, избегая путаницы.

Основная часть. Изучение **западной стены** в **помещении 6** на уровне **западных келий** обеих этажей позволило обнаружить большой фрагмент стены костёла, к которому было пристроено келейное здание.

Первоначально на первом этаже удалось выявить рустованные выступы (лопатки?) костёла шириной около 1,15 м, обложенные с двух сторон прикладами разновременным кирпичом. Частичная выборка обнаружила гладкие плоскости стены между ними и ряд красочных покрытий. Нижнее из них, молочного цвета, – фасад костёла XVIII в. Верхние слои краски (оттенки серого), появившиеся после пристройки корпуса в конце XVIII в., уложены по штукатурному заполнению рустовых пазов. Оба рустовых выступа

⁶ Аб'ект № 14.22: «Рэстаўрацыя с рэканструкцыяй былога жылога корпуса кляштара францысканцаў па вул. Ніжне-Пакроўская, 20 у г. Полацку (гісторыка-культурная каштоўнасць катэгорыі «2», XVIII ст.) з прыстасаваннем пад Музей археалогіі г. Полацка». 14.22 – КНД – Зн. Навукова даследчыя работы па зондажах. Навукова практычны цэнтр «Рэстабіліс». – Мінск, 2022.

Об'ект № 14.22: «Рэстаўрацыя с рэканструкцыяй былога жылога корпуса францысканскага кляштара па вул. Ніжне-Покровской, 20 в г. Полоцке (историко-культурная ценность категории «2», XVIII ст.) с приспособлением под Музей археологии г. Полоцка». Научно-исследовательские работы по зондажам (дополнение) 14.22 – КНД – Зн 1 ООО «Научно-проектный центр «Реставилис». – Минск 2022.

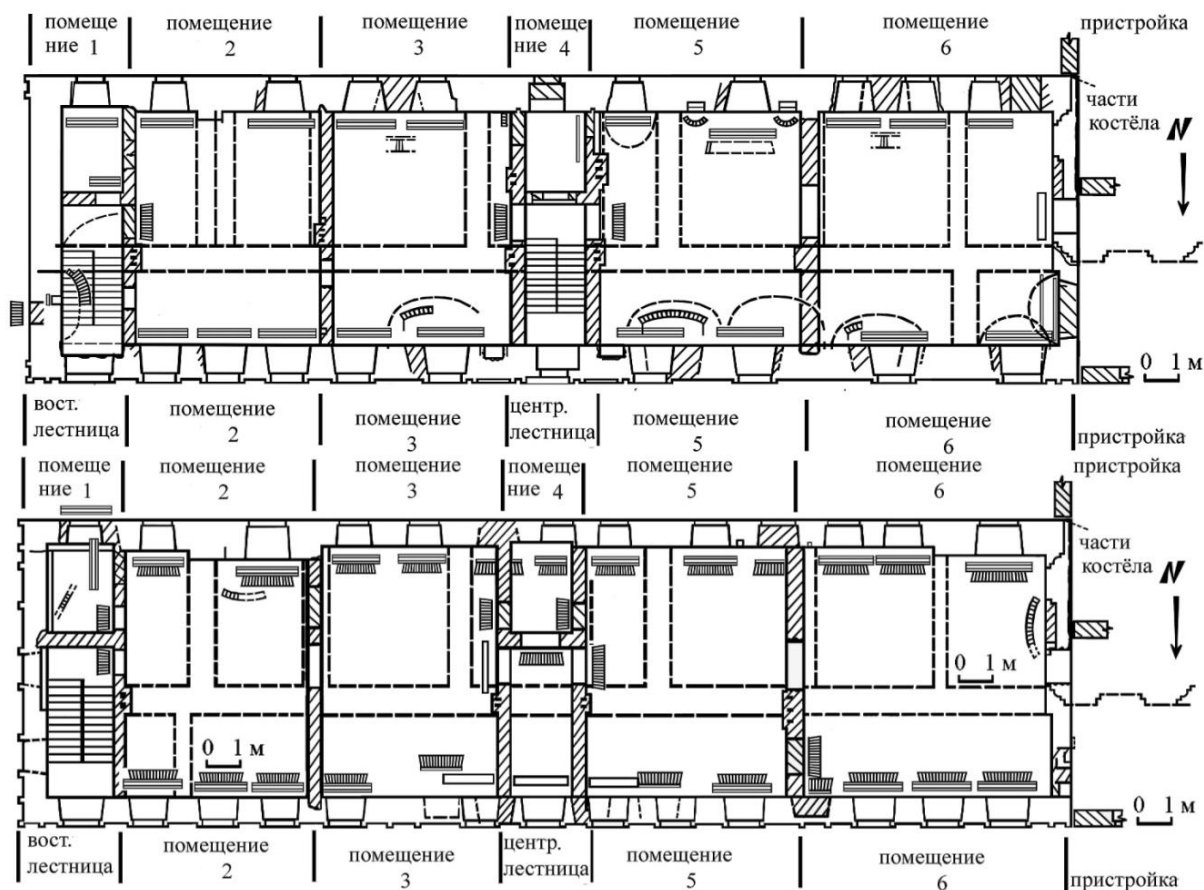
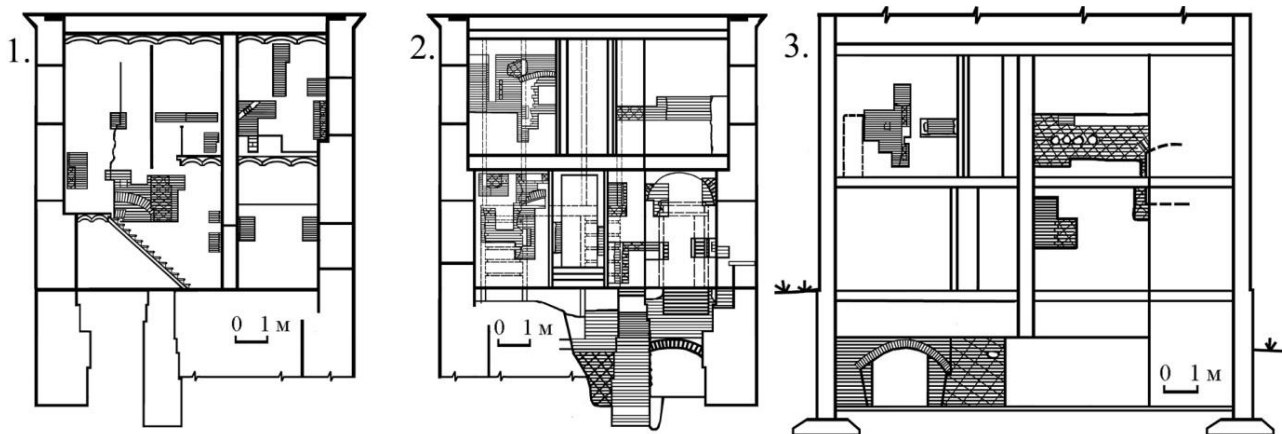


Рисунок 2. – Планы этажей келейного корпуса бывшего францисканского монастыря: верх первого этажа, низ второго этажа. Косой штриховкой обозначены поздние кладки, пунктиром – очертания колокольни костёла, первоначальные внутренние стены и следы распалубок сводов здания, отмечена конструкция перемычек разновременных проёмов и ниш как существующих, так и выявляемых



1 – восточная стена здания со стороны помещений; 2 – западная стена здания со стороны помещения; 3 – западная фасадная стена здания со стороны пристройки с контурами утраченного окна костёла

Рисунок 3. – Развертки торцевых стен келейного корпуса бывшего францисканского монастыря с обозначением зондажей и выявленных кладок (целая кирпичная кладка отмечена горизонтальными линиями, срубленные части – сетчатой штриховкой)

Ниша на втором этаже **помещения 6** имела арку на высоте около 2,3 м на уровне пят и 2,5 м на уровне замка от чистого пола. Для этого ступенчатые переходы к плоскости стены были срублены: под позднейшими наслоениями, связанными с пристройкой корпуса, прослежены остатки первоначальной штукатурки костёла с бледно жёлтым (молочным?) колером. Кладка над аркой и выступ были сильно повреждены и переложены с забивкой кирпичным боем. На высоте около 2,7–2,77 м от чистого пола прослежены два ряда срубленных кирпичей (развёрнуты тычками) предполагаемого карниза костёла, но расчистки показали, что с кладкой храма они не связаны: карниз или выступ, если и был здесь, относился к корпусу. Он располагался над аркой ниши на уровне первого этажа.

Расчистка в **помещении 6** на первом этаже также позволила выявить нишу, встроенную между двумя рустованными выступами путём введения лучковой арки, при этом выступы между рустами и пряслон были сохранены. Именно между выступами была врезана арка, её высота от существующего пола на уровне пяты около 2,6 м, на уровне замка – около 2,8 м. Ниша была окрашена в серый цвет. Её глубина около 37 см. Кладка над аркой на высоте около 3,2 м была неоднородная – много вертикальных и толстых горизонтальных швов, срубленных кирпичей, которые на уровне около 3,3 м от уровня пола образовывали ряд. Расчистки ветхой кладки над аркой ниши позволили проследить остатки ещё одной ниши, встроенной между выступами (её дно и окрашенные стенки). При этом наклонная обмазка, выявленная на поверхности стены при разборке обветшалых кладок, оказалась отпечатком пяты лучкового свода, начинавшегося на высоте около 3,5 м от существующего пола, судя по отпечаткам, – толщиной в половину кирпича. Данная пята перекрывала дно ниши второго этажа, вероятно, имеет более позднее происхождение. Это единственное место, где сохранились следы свода кельи (см. рисунок 3: 2).

Фрагмент фасадной стены восточного нефа костёла прослежен со стороны **пристройки** на уровне обоих этажей; он имеет срубленную поверхность. При расчистке срубленной кладки на уровне второго этажа от забивки мусором и позднего раствора обнаружены вставки небольших камней или их отпечатки на поверхности первоначального раствора. Изучение стыка пристройки с остатками стены костёла и корпуса выявило следы северного откоса оконного проёма восточного нефа храма. От пяты арки окна до уровня чистого пола помещения пристройки около 0,75 м. Зондаж под самым потолком первого этажа со стороны пристройки указал на продолжение данного окна. Здесь от его откоса уцелел один развёрнутый под углом кирпич. Вся поверхность стены, обращённая внутрь помещения, имела срубленную поверхность. Ниже начинался след подоконника, что позволяет восстановить высоту проёма со стороны нефа. От плиты потолка до угла с подоконником 0,5 м, таким образом, с учётом толщины перекрытия и пола (около 0,45 м), можно полагать, что высота проёма на уровне оконного отверстия (от его подоконника до пяты арки) составляла около 1,8 м, северный откос был практически в одной плоскости с южным фасадом келейного корпуса (рисунок 3: 3). Ряд выявленных в зондажах следов первоначальных конструкций, элементов планировки и интерьеров корпуса прослежен на обоих этажах и позволяет значительно скорректировать информацию известных Инвентарей 1818, 1823 и 1832 годов по кляштору⁷.

Зондажные работы на **восточной лестнице** показали, что на уровне первого этажа стены корпуса значительно толще, чем на уровне второго: поверхность северной стены частично была срублена для устройства междуетажной лестничной площадки (см. рисунки 2 и 3: 1). Сам же кляштор имеет по **восточной стене** ряд перекладок, говорящих о продолжении корпуса в восточном направлении. Об этом свидетельствует белёная поверхность штукатурки XVIII в., закрытая арочной перемышкой и возведённой над ней кладкой. Характер кладок, полные визуальные аналогии раствора, полное сходство кладочных швов, выделки кирпича и его размеры, говорят о том, что все эти перестройки велись в XVIII в.: сначала была врезана арка, но вскоре её замуровали, устроив небольшой дверной проём с клинчатой перемышкой. Это могло быть связано с устройством деревянных уборных в конце коридора, упоминаемых в Инвентаре 1818 г. Не исключено, что ими заменили первоначальные кирпичные⁸ (рисунок 3: 1).

Изучение поверхностей кладок **восточной стены** кляштора над аркой показало отсутствие следов срубленных сводов и их очертаний. Кладка с южной стороны откоса выявила следы срубленной продольной стены здания, отделявшей коридор от келий. Её толщина, судя по длине кирпичных штроб, составляла от 0,6 до 0,45 м (1,5–2,0 кирпича XVIII в.). Там же, на уровне первого этажа, находилась кладка срубленной пяты полукруглой арки, прорезавшей продольную стену здания. Характер кладки позволяет предполагать существование здесь арочной ниши. Полная расчистка показала, что толщина арки (а значит и толщина продольной стены) составляла 0,7–0,75 м на уровне первого этажа, на её уцелевшей поверхности сохранился слой раствора с отпечатком опалубки. Выше арки продольная стена была значительно тоньше, судя по срубленной кладке, её толщина на уровне второго этажа – около 0,45–0,5 м, что говорит о наличии деревянных перекрытий. На уровне второго этажа у **восточной стены** на **восточной лестнице** и в **помещении 1** зондажами был выявлен ряд перекладок, вероятно связанных с переделками первоначальных оконных проёмов и ниш (под сводами второго этажа зондажные работы не велись). Там же в южной части стены прослежен фрагмент лестничного свода XVIII в., имеющий наклон в северном направлении. Кладка свода выполнена в «ёлку», подобно лестницам Полоцкого иезуитского коллегиума [7, с. 41]. Данная лестница первоначально вела на чердак. Следы лестниц между этажами обнаружить не удалось.

Изучение **восточной стены** корпуса по фасаду на уровне первого этажа выявило отсутствие следов украшений или перевязанных с ней утраченных кирпичных конструкций. Обнаружены только откосы арочного и встроенного в него дверного проёма, который вёл в уборную (см. рисунки 2 и 3: 1).

Следы продольной стены между кельями и коридором прослежены и по линии **западной стены** в **помещении 6** на обоих этажах бывшего монастырского корпуса. При этом данная стена имеет различную толщину: на уровне келий (южная сторона/фрагмент костёла) она толще на 30 см, чем на уровне коридора (северная сторона). Там же, на уровне первого этажа, прослежены срубленные пяты полуциркулярного свода и остатки дверного проёма, который был не раз переложён. Вероятно, это и был главный вход в кляштор со стороны костёла,

⁷ См. сноску 2.

⁸ Там же.

который упомянут в Инвентарях. Первоначальную перемышку данный проём не сохранил. Существующие конструкции устроены из дерева в XX в. и положены на позднейшие кирпичные прикладки к первоначальным откосам двери (см. рисунок 3; 2).

Зондажи по **южной стене** здания на обоих этажах позволили обнаружить срубленные капитальные стены между уничтоженными кельями в **помещениях 2–6**. Фрагменты некоторых из них были встроены в состав существующих. Так, фрагмент стены между **помещениями 5 и 6** имел ровный шов с поздней прикладкой. Его расчистка с обеих сторон показала, что это откос высокой ниши, обращённой в **восточную келью помещения 6** (следов пяты её арки не обнаружено). Следы подобного проёма или ниши с лучковой аркой прослежены и на втором этаже (рисунок 4). Изучение следов кладок **помещения 5** на уровне **первого этажа** позволило выявить и следы коридорчика с выходом на монастырский двор (он указан в Инвентарях 1818 и 1823 гг.). С правой стороны его бывшего первоначального дверного проёма, переделанного в окно, прослежен фрагмент полуциркулярного цилиндрического свода толщиной в половину кирпича⁹ (см. рисунки 2 и 4).

Ряд первоначальных оконных проёмов келий **первого этажа** был полностью перебит. Изначально каждая келья имела одно окно, но в некоторых помещениях в конце XIX – начале XX вв. были пробиты дополнительные. Следы первоначальных окон представлены фрагментами центральных частей клинчатых перемычек в **восточных кельях помещений 3 и 6**. При расчистках в **западной келье помещения 5** по сторонам первоначального окна были обнаружены и расчищены две глубокие ниши с лучковыми арками. Расчистка показала, что глубина ниш около 0,35 м, на штукатурке XVIII в. сохранились различные слои побелок от белого до серого колеров, сделанные до их замуровки в 60-х гг. XIX в. Обе ниши имели дно значительно выше уровня первоначального пола. В обеих нишах частично сохранились первоначальные деревянные полки XVIII в., для которых в их боковых стенах были сделаны оштукатуренные пазы. Толщина полок составляла около 3,0 см, у сохранившихся фрагментов имелась обмазка в месте примыкания к стенам и серая окраска досок. Это была известковая штукатурка, аналогичная той, что покрывала стены. Остатки сводов помещения полностью уничтожены, а место их примыкания к стенам заполнено более поздней кладкой. Для закладок ниш были использованы половинки большемерного кирпича, основная масса которых без косых борозд, что характерно для изделий конца XVIII в. Среди них найден и образец лекального кирпича в виде половинки круга диаметром около 30,0 см, габаритами она отличается от подобных изделий Полоцкого иезуитского коллегиума. Лекальные кирпичи коллегиума имели окружность около 38,0–39,0 см и были рассчитаны на выкладку колонн диаметром 40,0–42,0 см [7, с. 51].



Рисунок 4. – Развертки продольных стен келейного корпуса бывшего францисканского монастыря со стороны помещений на уровне этажей с обозначением зондажей и выявленных кладок (целая кирпичная кладка отмечена горизонтальными линиями, срубленные части – с сетчатой штриховкой, пунктиром отмечены следы утраченных сводов и проёмов: вверху – южная стена, внизу – северная стена)

⁹ См. сноску 2. – С. 6–7.

Обращает на себя внимание различная толщина **южной стены верхнего этажа** на уровне уничтоженных келий. Как показали зондажные работы, многие её участки переложены или их поверхность срублена (как на уровне **помещений 1 и 2**). В восточной части данные разрушения были связаны со срубом пят арок и сводов лестниц. Так, на уровне **помещения 2** прослежена восточная часть глубокой ниши с лучковой аркой, над которой имелись следы срубленных кладок конструкций.

В отличие от первого этажа, кельи **второго этажа** сохранили ряд первоначальных окон. Их характерной конструктивной особенностью было наличие не только кирпичных клинчатых перемычек, но и деревянной доски около 4,0 см толщиной, предотвращавшей провал в случае подвижки опор. В начале XX в. ряд перемычек первоначальных окон был реконструирован. Деревянные доски были выломаны, кладка перемычек подрублена и усилена двутавровыми швеллерами или рельсами, закрытыми кирпичом. При этом следов значительного перебивания окон на южной стене не обнаружено.

Зондажные работы по **северной стене** на обоих этажах выявили следы первоначальных коридоров бывшего келейного корпуса. На уровне первого этажа в **помещениях 2, 3, 5, 6** на стенах были прослежены контуры очертаний лотков срубленного цилиндрического свода и фрагменты первоначальных оконных впадин с лучковыми арками (см. рисунки 2 и 4). В **помещении 6, в коридоре**, прослежены штробы от примыкания стены, отделявшей основной коридор корпуса от тамбура, перед главным входом в здание со стороны костёла. Большинство коридорных окон **второго этажа** также имели не только кирпичные клинчатые перемычки, но и деревянные доски около 4,0 см толщиной для сохранения от провала.

На уровне **центральной лестницы** и смежных с ней **помещений 3 и 5** в поздних закладках прослежены тонкие простенки трёх первоначальных арочных окон. Они известны по плану главного фасада здания 1869 г. [5, с. 36; рис. 3], но при пробивке поздних проёмов и устройстве в начале XX в. капитальных стен для опоры лестницы все остатки арок центральных окон были выломаны. Их и заменили плоскими металлическими перемычками. Часть из них были позже усилены бетоном. При изучении **помещения 2** в простенке между окнами северной стены прослежена кирпичная штроба для перевязки поперечной кирпичной стены, которая отделяла основной коридор корпуса от отсека с первоначальной лестницей. На уровне первого этажа следов данной стены не прослежено (см. рисунки 2 и 4).

Зондажные работы по **фасадной стороне северной стены** на уровне первого этажа показали, что его существующая архитектура не первоначальна. Выявленные следы оконных проёмов позволили проследить срубленную кладку их массивных обрамлений и следы ржавчины от крепежа одной из металлических решёток. Окна упомянуты в Инвентарях 1818 и 1823 годов. Таким образом, первоначальные обрамления окон обоих этажей монастырского корпуса были аналогичны убранству проёмов коллегиума и бернардинского монастыря в Полоцке. До реконструкции 1860-х гг. изучаемое нами здание сохраняло неоштукатуренную поверхность стен. На их красном кирпичном фоне выделялись оштукатуренные и белёные обрамления окон, карнизы и пояски, как это было на корпусе бернардинского монастыря до его реконструкции в конце XIX в.¹⁰ [8, с. 207–208; 9, с. 80–81]. Следы первоначальной архитектуры фасадов здания найдены на втором этаже со стороны **пристройки**. На первоначальной кладке стены прослежен фрагмент массивного обрамления декоративной ниши, очертания которой повторяли контур окна. Характер расположения ниши говорит о том, что она ориентирована на коридор и, возможно, должна была имитировать окно в его торцевой стене.

Следы реконструкции 60-х гг. XIX в. среди различных перекладок здания выделить сложно, поскольку для них применялся кирпич от разборки здания и, визуально схожий с первоначальным, кладочный раствор. К подобным работам можно отнести закладку двух ниш **на южной стене в западной келье помещения 5 и в западной стене** (встроены в архитектуру костёла) **западной кельи помещения 6**.

При перестройке здания в конце XIX – начале XX вв. новые несущие стены глубоко врезались в массивы кладок XVIII в., одновременно ряд первоначальных оконных проёмов были смещены. Их откосы нередко переложены, а перемычки усилены двутавровыми швеллерами, над откосами применялась выкладка кирпичом на кромку. Первоначальные дверные проёмы поперечных стен конца XIX – начала XX вв. имели кирпичные клинчатые перемычки. На уровне первого и второго этажа **помещения 2 и 3** в конце XIX – начала XX вв. были полностью изолированы друг от друга. Также на уровне первого этажа были изолированы **помещения 5 и 6**. На уровне **второго этажа помещения 5 и 6** сообщались между собой через небольшую дверь, замурованную, видимо, после пробивки коридора. Для устройства дымовых каналов в стенах устраивались специальные выступы. В ряде случаев на стенах помещений прослежены фрагменты покрасок начала XX в. в виде панелей различных цветов, довольно прочные. Редкой находкой стали следы примыкания деревянной перегородки. С обеих сторон от неё были прослежены пороги штукатурки на утраченную конструкцию.

Заключение. На основе проведенных зондажных работ можно сделать следующие выводы:

- возведение костёла предшествовало строительству келейного корпуса, который примыкал к северо-восточной колокольне храма;
- колокольни имели рустованные внизу лопатки и округлые углы, акцентировавшие главный фасад костёла (рисунок 5);
- при возведении корпуса закрытая им архитектура костёла была частично срублена, а частично вмурована в его состав, со стороны келий на обоих этажах между лопатками были устроены ниши;

¹⁰ См. сноску 9.

- первоначальная архитектура фасадов корпуса сегодня не сохранилась и была представлена массивными обрамлениями окон, аналогичными корпусам иезуитов, бернардинов и базилиан. Она сочетала неоштукатуренную поверхность кирпичной кладки с оштукатуренными побеленными обрамлениями окон, поясков, карнизов;
- главный вход в кляштор был не через костёл, а рядом с ним: через корпус. Его оформление требует дополнительных исследований, скорее всего, он представлял собой портал, выделяющийся на фоне кирпичной кладки стены;
- своды украшали помещения только первого этажа и лестничные конструкции, на втором этаже их следов не обнаружено;
- в восточной части здания имела кирпичная пристройка с первоначальными уборными, видимо, позднее их заменили деревянными на старых фундаментах;
- при реконструкции здания в 60-х гг. XIX в. большинство внутренних стен были выломаны, своды разрушены, частично уцелела только продольная стена между бывшими кельями и коридором. Тогда же фасады начали приобретать современный облик, при этом часть южной стены на втором этаже была переложена;
- следующий капитальный ремонт здания вёлся в конце XIX – начале XX вв. старая планировка была полностью ликвидирована, возведены несущие поперечные стены и сохранившиеся сегодня лестницы и своды на швеллерах. Ряд оконных проёмов был перебит, у первоначальных проёмов усилены металлом перемычки. Определенные помещения здания первоначально были полностью изолированы друг от друга.

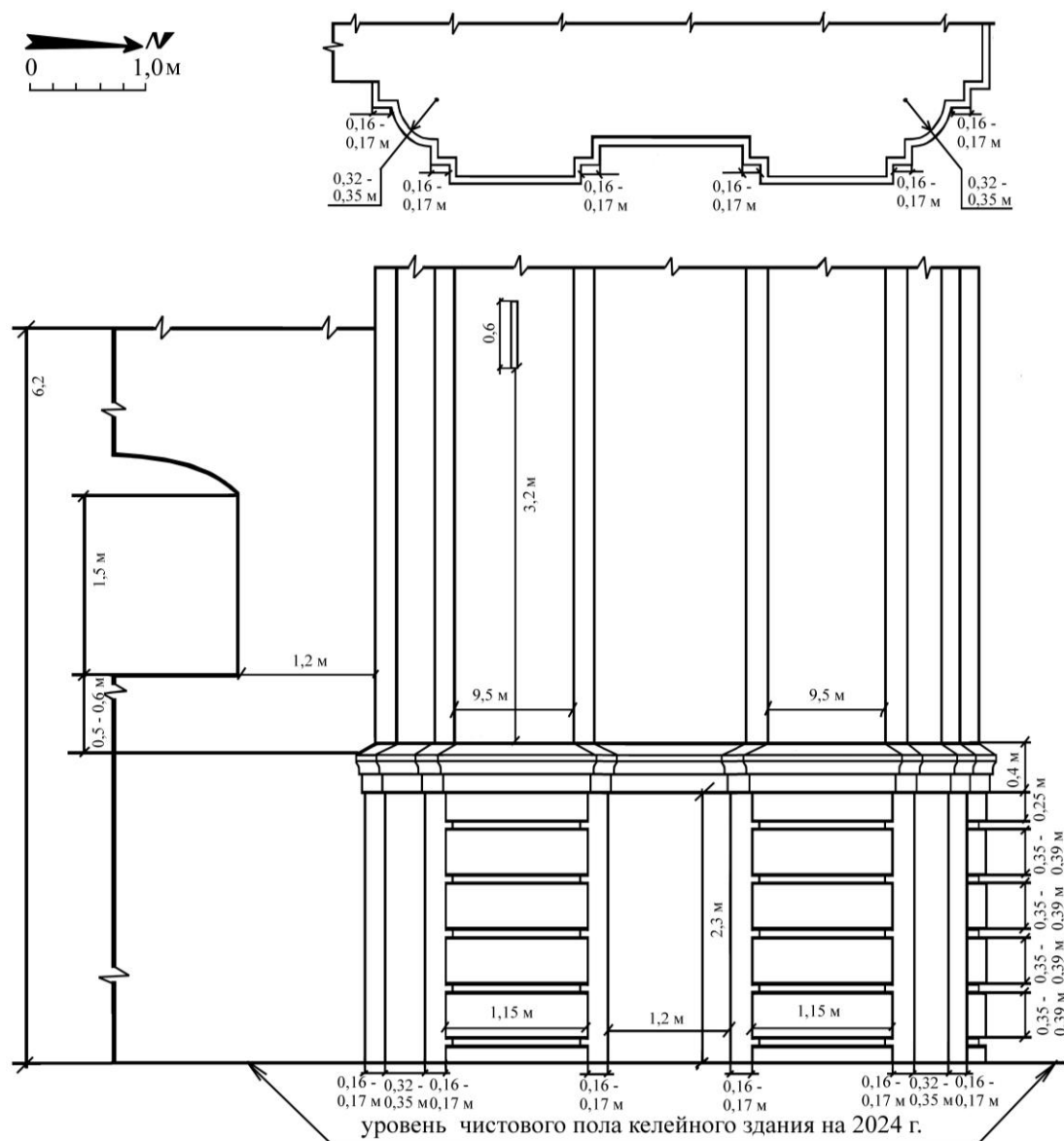


Рисунок 5. – Графическая реконструкция архитектурного убранства фрагмента восточной стены костела с частичными промерами: вверху – план очертаний (вид сверху) восточного фасада колокольни костела; внизу – убранство восточной части фасада колокольни и фрагмент восточного нефа с реконструкцией части окна

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярашэвіч А. Полацкі кляштар францысканцаў // Вялікае княства Літоўскае: энцыкл.: у 2 т. / Беларус. нав.-дасл. ін-т дакументазнаўства і архіўнай справы; рэдкал.: Г.П. Пашкоў. – Мінск: Бел. энцыкл., 2005–2006, 2005–2010. – Т. 2. – 2007. – С. 453.
2. Памяць: гіст.-дак. хроніка Полацка / рэдкал.: Г.П. Папкоў (гал. рэд.). – Мінск: Бел. энцыкл., 2002. – 912 с. – С. 202.
3. Чантурія Ю.В. Белорусское градостроительное искусство: средневековое наследие, ренессанс, барокко, классицизм в контексте европейского зодчества. – Минск: Бел. навука, 2017. – 503 с.
4. Данько Л.Ф. Храм Покрова Пресвятыя Богородицы во граде Полоцке // Полоцкий летописец: историко-литературный журнал. – 1992. – № 1. – С. 82–84.
5. Колосовская А.Н. Архитектура католических монастырей Беларуси первой половины XIX века // Архитектура: сб. науч. тр. – 2013. – Вып. 6. – С. 32–39.
6. Салаўёў А.А. Гарадская прастора Полацка ў складзе Расійскай імперыі (канец XVIII – пачатак XX ст.): гістарычныя традыцыі і новыя рэаліі // Полацк у святле станаўлення гістарычных і нацыянальных форм беларускай дзяржаўнасці (IX–XX стст.) / Д.У. Дук і інш. – Магілёў: МДУ імя А.А. Куляшова, 2019. – С. 77–96.
7. Соловьёв А.А. Полоцкий иезуитский коллегиум в ретроспективе (1581–1914): архитектурно-археологический очерк. – Полоцк: Полоц. книжн. изд-во, 2012. – 97 с.
8. Салаўёў А.А. Полацкі езуіцкі калегіум // Археалогія Беларусі: у. 2 т. / рэдкал.: Т.У. Бялова (гал. рэд.). – Мінск: Бел. энцыкл. імя П. Броўкі, 2011. – Т. 2. Л – Я. – С. 207–208.
9. Полоцкое Радование: Свято-Евфросиниевские Торжества 1910 года / ред. А.Г. Борисова-Горюнова. – Полоцк: Свято-Евфросиниевский женский монастырь в г. Полоцке Полоцкой епархии Белорусской Православной Церкви, 2010. – 437 с.

REFERENCES

1. Yarashevich, A. (2007). Polatski klyashtar frantsyskantsau. In G.P. Pashkou (Eds.) *Vyalikae knyastva Litouskai*: v 2 t. T. 2. (345). Minsk: Bel. entsykl. (In Belarus.).
2. Papkow, G.P. (Eds.) (2022). *Pamyat': gistoryka-dakumental'naya khronika Polatska*. Minsk: Bel. entsykl. (In Belarus.).
3. Chanturiya, Yu.V. (2017). *Belorusskoe gradostroitel'noe iskusstvo: srednevekovoe nasledie, renessans, barokko, klassitsizm v kontekste evropeiskogo zodchestva*. Minsk: Bel. navuka. (In Russ.).
4. Dan'ko, L.F. (1992). Khram Pokrova Presvyatyya Bogoroditsy vo grade Polotske. *Polotskii letopisets: istoriko-literaturnyi zhurnal*, 1, 82–84. (In Russ.).
5. Kolosovskaya, A.N. (2013). Arkhitektura katolicheskikh monastyrei Belarusi pervoi poloviny XIX veka [Architecture of Catholic monasteries of Belarus of the first half of the XIX century]. *Arkhitektura*, (6), 32–39. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Salauue, A.A. (2019). Garadskaya prastora Polatska u skladze Rasiiskai imperyi (kanets XVIII – pachatak XX st.): gistorychnyya tradytsyi i novyya realii. In D.U. Duk [et al.] *Polatsk u svyatile stanaulennyya gistorychnykh i natsyyanal'nykh form belaruskai dzyarzhavnashti (IX–XX stst.)* (77–96). Magileu: MDU imya A.A. Kulyashova. (In Belarus.).
7. Salauue, A.A. (2012). *Polotskii iezuitskii kollegium v retrospektive (1581–1914)*. Polotsk: Polots. knizhn. izd-vo. (In Russ.).
8. Salauue, A.A. (2011). Polatski ezuitski kalgium. In T.U. Byalova (Eds.) *Arkhealogiya Belarusi*: v 2 t. T. 2. (207–208). Minsk: Bel. entsykl. (In Belarus.).
9. Borisova-Goryunova, A.G. (Eds.) (2010). *Polotskoe Radovanie: Svyato-Evfrosinievskie Torzhestva 1910 goda*. Polotsk: Svyato-Evfrosinievskaia zhenskii monastyr' v g. Polotske Polotskoi eparkhii Belorusskoi Pravoslavnoi Tserkvi. (In Russ.).

Поступила 23.01.2024

RESULTS OF FIELD STUDIES OF THE WALLS OF A HOUSE ON ST. NIZHNE-POKROVSKAYA, 20 (CELL BUILDING OF THE FORMER FRANCISCAN MONASTERY) IN POLOTSK

A. SOLOVIEV

(Polotsk National Historical and Cultural Museum-Reserve)

The article presents the results of the probing work on the walls of the cell building of the former Franciscan monastery. They helped to identify a number of reconstructions of different times, the remains of the constructions and the elements of the original layout and interiors, which is completely lost today and which is partially known only from the inventory descriptions of 1818, 1823 and 1832. Also according to the latest studies, some of the fundamental alterations of the building for the needs of various institutions located there were discovered. The niches with partially preserved wooden shelves and paintings of the XVIII – first third of the XIX centuries and the alterations in the eastern part of the building are of the particular interest. Preserved in the building, the fragment of the completely lost eastern facade of the church became the unique find. That's how the sequence of the construction of the main buildings of the monastery was clarified.

Keywords: Polotsk, the Franciscan monastery, probing, the church wall, rust, niches.

УДК 691.263.5

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-67-78

**КОМПОЗИЦИОННОЕ ГИПСОВОЕ ВЯЖУЩЕЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДОЛОМИТОВОЙ МУКИ И ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ****М.П. ТОЛМАЧ, Н.В. РАЩИНСКИЙ, канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА**
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлены результаты исследований физико-механических свойств композиционного гипсового вяжущего (КГВ), содержащего в своем составе золошлаковую смесь, доломитовую муку и портландцемент. Получены математические модели влияния рецептурных факторов на основные физико-механические свойства КГВ: прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, плотность, водопоглощение и пористость, позволяющие провести оптимизацию состава сырьевых компонентов композиционного гипсового вяжущего. Показано, что, изменяя содержание рецептурных факторов в составе КГВ, можно варьировать физико-механические характеристики: прочность на сжатие в диапазоне от 9,4 до 13,2 МПа, прочность на растяжение при изгибе – от 3,2 до 5,7 МПа, плотность – от 1345 до 1468 кг/м³, водопоглощение – от 18,2 до 24,4%. На основе оптимизированного состава сырьевой смеси КГВ получен гипсобетон с прочностью на сжатие 13,3 МПа и коэффициентом размягчения 0,44, который может быть использован для изготовления стеновых блоков.

Ключевые слова: композиционное гипсовое вяжущее, золошлаковые отходы, доломитовая мука, оптимизация состава, физико-механические свойства, гипсобетон.

Введение. Одним из направлений решения важнейшей задачи современного строительства, заключающейся в ресурсо- и энергосбережении, является разработка и применение материалов на основе местных сырьевых ресурсов и отходов производства. Особое значение уделяется стеновым ограждающим конструкциям, которые наряду с высокими теплотехническими показателями должны быть долговечными, экологически чистыми и пожаробезопасными. Этим требованиям отвечают стеновые материалы на основе композиционных гипсовых вяжущих. Эколого-экономические аспекты производства и применения гипсовых материалов и изделий рассматриваются в работах А.В. Волженского [1], А.Ф. Ферронской¹, Н.Н. Башкатова [2], Е.В. Войтович², В.Б. Петропавловской³, Д.Е. Кучерова⁴, где отмечается, что при реализации технологии КГВ отсутствует высокотемпературный синтез, являющийся основой подавляющего большинства технологий получения минеральных вяжущих, отсутствуют выбросы CO₂, пыли и других вредных компонентов, и в целом производство самих КГВ и материалов на их основе менее энергоемко по сравнению с производством портландцемента и извести. Разработке и исследованию свойств КГВ посвящен ряд исследований^{5,6,7}, в которых показано, что материалы и изделия на основе композиционных гипсовых вяжущих имеют свои конкурентные преимущества, заключающиеся в обеспечении оптимального температурно-влажностного режима в помещениях, показателях тепло- и звукоизоляции, не уступающие или выше, чем у аналогичных материалов на цементном вяжущем при более простой технологии производства.

В качестве структурообразующих компонентов КГВ исследователи⁸ [3–7] наряду с природным сырьем предлагают включать в состав КГВ и показывают эффективность применения отходов промышленных предприятий, среди них: кремнеземный компонент, торфяная зола, перлитовая пыль, керамзитовая пыль, литейный шлак, золошлаковые отходы (ЗШО). Характеристики применяемых промышленных отходов существенно отличаются, что требует от разработчиков при применении нового сырьевого компонента в составе КГВ проведения комплекса исследований по определению оптимального содержания компонентов для достижения требуемых эксплуатационных характеристик.

¹ Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): Справочник / под общ. ред. А.Ф. Ферронской. – М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2004. – 485 с.

² Войтович Е.В. Композиционное гипсовое вяжущее с применением наноструктурированного кремнеземистого компонента и материалы на его основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Белгород, 2012. – 23 с.

³ Петропавловская В.Б. Безобжиговые гипсовые композиты с повышенными эксплуатационными свойствами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09. – Тверь, 2019. – 34 с.

⁴ Кучеров Д.Е. Композиционные вяжущие с минеральными добавками различного генезиса и бетоны на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Белгород, 2011. – 145 л.

⁵ См. сноски 2–4.

⁶ Гаифуллин А.Р. Композиционные гипсовые материалы с добавками керамзитовой пыли: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Казань, 2012. – 20 с.

⁷ Алтыкис М.Г. Экспериментально-теоретические основы получения композиционных и многофазовых гипсовых вяжущих веществ для сухих строительных смесей и материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. – Пенза, 2003. – 48 с.

⁸ См. сноски 2–4, 6, 7.

Местными сырьевыми ресурсами Витебского региона Республики Беларусь являются доломитовая мука производства ОАО «Доломит» и золошлаковые отходы от сжигания торфодревесной смеси по технологии кипящего слоя на Белорусской ГРЭС в г.п. Ореховск. В общем по республике объем золошлаковых отходов, образующихся в течение года, составляет около 13 тыс. т, находится на золоотвалах 119,8 тыс. т. [8]. Вопрос совместимости доломитовой муки с золошлаковыми отходами от сжигания торфодревесной смеси в составе КГВ для получения допустимых эксплуатационных характеристик КГВ в научной литературе не освещен. В связи с этим проведение исследований по оценке совместимости данного сырья в составе КГВ, получение новых экспериментальных данных о реологических и физико-механических свойствах КГВ с золошлаковыми отходами и доломитовой мукой, получение закономерностей влияния компонентного состава на свойства КГВ и разработка состава сырьевой смеси КГВ для стеновых материалов достаточно актуальны.

Настоящие исследования были направлены на решение следующих задач:

- 1) исследование влияния на реологические и физико-механические свойства КГВ, изменение рецептуры путем включения в состав двухкомпонентной комплексной добавки, состоящей из портландцемента и золошлаковой смеси, портландцемента и доломитовой муки;
- 2) оптимизация состава трехкомпонентной комплексной добавки КГВ на основе низкомарочного гипса с использованием метода математического планирования эксперимента;
- 3) исследование физико-механических свойств гипсобетонов на основе КГВ, включая плотность, прочность, водопоглощение, коэффициент теплопроводности и звукоизоляционные свойства.

Исследования проводились в рамках НИР «Легкие бетоны на основе биозаполнителя и комплексного гипсового вяжущего для стеновых ограждений», выполняемой по гранту Министерства образования Республики Беларусь (номер государственной регистрации 20230695 от 16.05.2023).

Характеристика материалов и методика проведения исследований. Для проведения экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

- гипс строительный «Тайфун Мастер» № 35 марки Г-5 III А производства ООО «Тайфун» по ГОСТ 125⁹; время начала схватывания гипса составило 9 мин 30 с, время окончания схватывания – 15 мин, коэффициент нормальной густоты – 0,56;
- гипс строительный марки Г-4 КНАУФ-Шнелгипс по ГОСТ 125⁹; время начала схватывания гипса составило 6 мин, время окончания схватывания – 10 мин, коэффициент нормальной густоты – 0,64;
- вода для затворения вяжущего и гипсобетона по ГОСТ 23732¹⁰;
- золошлаковая смесь, которая образуется при сжигании топливной смеси, состоящей из 50% древесной щепы и 50% торфа, на Белорусской ГРЭС г.п. Ореховск Витебской области. Химический состав золошлаковой смеси по ГОСТ 10538¹¹ представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав золошлаковой смеси Белорусской ГРЭС (мас., %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	ППП
87.62	4.39	1.08	3.08	0.55	0.61	1.79	0.24	0.19	<0.10	0.07

По химическому составу золошлаковая смесь состоит на 92% из оксидов кремния и алюминия. Содержание оксида кальция и оксида магния составляет 3,63%, т.е. по модулю основности ($M_o < 1$) золошлаковая смесь относится к кислым. Влажность золошлаковой смеси составляла 6%, тонкость помола (остаток на сите № 008) – 2,3%, насыпная плотность – 960 кг/м³;

- мука известняковая (доломитовая) по ГОСТ 14050¹², изготовитель «Доломит» ОАО, г. Витебск, Беларусь; влажность доломитовой муки составила 0,23%, тонкость помола (остаток на сите № 008) – 0,07%;
- портландцемент Белорусской цементной компании ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108¹³; нормальная густота – 26%, начало схватывания – 150 мин, конец схватывания – 205 мин, предел прочности на сжатие в возрасте 28 сут – 49,5 МПа, тонкость помола (остаток на сите № 008) – 1,8%.

Сроки схватывания, прочность на растяжение при изгибе, прочность при сжатии, водопоглощение, водостойкость гипсового вяжущего определялись по методике ГОСТ 23789¹⁴, пористость – по ГОСТ 12730.4¹⁵, плотность – по ГОСТ 12730.1¹⁶. Для проведения испытаний изготавливались образцы-балочки размером 40×40×160 мм. Прочность на растяжение при изгибе определялась путем испытаний образцов на испытательной машине МИИ-100, прочность на сжатие – на прессе гидравлическом ПГМ-1000МГ4 А.

⁹ ГОСТ 125-2018 Вяжущие гипсовые. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.

¹⁰ ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – М.: Госстандарт, 2013. – 18 с.

¹¹ ГОСТ 10538-87 Топливо твердое. Методы определения химического состава золы. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.

¹² ГОСТ 14050-93 Мука известняковая (доломитовая). Технические условия. – Минск: Изд-во стандартов, 2003. – 12 с.

¹³ ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020. – 15 с.

¹⁴ ГОСТ 23789-2018 Вяжущие гипсовые. Методы испытаний. – М.: Госстандарт, 2019. – 18 с.

¹⁵ ГОСТ 12730.4-2020 Бетоны. Методы определения параметров пористости. – М.: Госстандарт, 2021. – 14 с.

¹⁶ ГОСТ 12730.1-2020 Бетоны. Методы определения плотности. – М.: Госстандарт, 2020. – 13 с.

Для определения физико-механических характеристик гипсобетона на основе оптимизированного состава КГВ изготавливались образцы-кубы с ребром 70 мм. Прочность гипсобетона на сжатие определяли по ГОСТ 10180¹⁷, водопоглощение – по ГОСТ 12730.3¹⁸. Образцы сушили при температуре 50±5 °С до постоянного веса в сушильном шкафу SNOL60/300 LFN. Коэффициент теплопроводности измеряли с помощью прибора ИТП-МГ4 на образцах плит размером 250×250×30 мм по СТБ 1618¹⁹. Звукоизоляционные свойства гипсобетона исследовали с помощью учебной акустической камеры по СТБ EN ISO 10140-414²⁰. Математическая обработка результатов исследования проводилась в компьютерной программе «PlanExp B-D13», разработанной в среде программирования Microsoft Visual Basic 6.0.

Экспериментальные исследования. Последовательность проведения экспериментальных исследований была направлена на определение влияния на свойства КГВ портландцемента как основного компонента и портландцемента в сочетании с минеральными добавками, являющимися местными сырьевыми ресурсами: золошлаковой смесью и доломитовой мукой. Важнейшими показателями КГВ, которые в дальнейшем определяют качество изделий, являются реологические и физико-механические характеристики. В экспериментальных исследованиях изучались следующие реологические характеристики КГВ: начало, конец и продолжительность схватывания. Для проведения исследований использовались гипс строительный марки Г-4 КНАУФ-Шнелгипс и портландцемент ЦЕМ I 42,5Н. Было изготовлено три состава КГВ с содержанием портландцемента 5, 10 и 15% от массы гипсового вяжущего. Водогипсовое отношение, равное 0,64, соответствовало нормальной густоте гипсового вяжущего. Результаты исследования представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Влияние портландцемента на реологические свойства КГВ

Номер состава	Портланд-цемент, % от массы гипсового вяжущего	Начало схватывания, мин-с	Конец схватывания, мин-с	Продолжительность схватывания, мин-с	Плотность кг/м ³ , в возрасте 7 сут	Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 7 сут		Прочность на сжатие в возрасте 7 сут	
						МПа	%	МПа	%
контр.	0	6	10	4	1242	1,99	100	3,36	100
1	2	5–30	9-30	5	1296	2,75	138	3,60	107
2	5	2	8	6	1328	2,64	133	5,14	153
3	10	2–30	7	4–30	1331	2,69	135	5,22	155
4	15	3	5–30	2–30	1335	2,96	148	4,79	142

В результате исследований было установлено, что введение портландцемента в состав гипсового вяжущего ускоряет начало и конец схватывания. При этом наибольшее сокращение времени начала схватывания произошло при введении портландцемента в количестве, равном 5% от массы гипсового вяжущего, и составило 2 мин, в отличие от 6 мин – времени начала схватывания гипсового вяжущего без портландцемента. Дальнейшее увеличение количества портландцемента не оказывает существенного влияния на начало схватывания. Так, увеличение количества портландцемента на каждые 5% массы гипсового вяжущего отдаляло начало схватывания на 30 с. При этом продолжительность схватывания увеличилась с 4 до 6 мин при введении портландцемента в количестве 5% от массы гипсового вяжущего; при введении портландцемента в количестве 10% продолжительность схватывания сопоставима с гипсовым вяжущим контрольного состава. При увеличении количества портландцемента до 15% продолжительность структурообразования гипсоцементного камня сократилась до 2 мин 30 с.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение количества портландцемента в составе КГВ приводит к увеличению прочности на растяжение при изгибе на 48% при количестве 15% от массы гипсового вяжущего, к увеличению прочности на сжатие на 55% при количестве 10% от массы гипсового вяжущего. При увеличении количества портландцемента с 10 до 15% прочность на сжатие снизилась на 13%. С увеличением количества портландцемента плотность камня из гипсоцементного композита увеличилась с 1242 кг/м³ до 1335 кг/м³ при количестве портландцемента 15% от массы гипсового вяжущего.

Исследование влияния доломитовой муки на свойства композиционного гипсового вяжущего. На основании анализа реологических и прочностных характеристик для проведения дальнейших исследований принято количество портландцемента в составе КГВ, равное 10% от массы гипсового вяжущего. Доломитовая мука вводилась в количестве 5, 10 и 20% от массы гипсового вяжущего. Испытания проводились с использованием строительного гипса марки Г-4 КНАУФ-Шнелгипс. Водогипсовое отношение было равно 0,64. Результаты исследований влияния доломитовой муки на свойства композиционного гипсового вяжущего представлены в таблице 3.

¹⁷ ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Госстандарт, 2015. – 33 с.

¹⁸ ГОСТ 12730.3-2020 Бетоны. Метод определения водопоглощения. – М.: Госстандарт, 2020. – 10 с.

¹⁹ СТБ 1618-200 6 Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме. – М.: Минстройархитектура, 2006. – 12 с.

²⁰ СТБ EN ISO 10140-4-2013 Акустика. Лабораторные измерения звукоизоляции строительных конструкций и изделий. Часть 4. Методы измерений и требования. – М.: Госстандарт, 2013. – 16 с.

Таблица 3. – Влияние доломитовой муки на плотность и прочность КГВ

Номер состава	Компонентный состав, % от массы гипсового вяжущего		Плотность, кг/м ³ , в возрасте 7 сут	Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 7 сут		Прочность на сжатие в возрасте 7 сут	
	портланд-цемент	доломитовая мука		МПа	%	МПа	%
контр.	—	—	1242	1,99	100	3,36	100
1	10	—	1331	2,69	135	5,22	155
2	10	5	1414	2,85	143	4,01	119
3	10	10	1498	2,69	135	4,49	133
4	10	20	1543	2,57	129	4,76	141

Установлено, что при содержании доломитовой муки в количестве 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего плотность увеличилась соответственно на 6; 12,5; 15,9%. При этом прочность на растяжение при изгибе (2,57–2,85 МПа) остается в пределах сопоставимых значений с прочностью гипсоцементного камня без доломитовой муки (2,69 МПа).

Для прочности на сжатие при добавлении доломитовой муки наблюдается тенденция к снижению значений по отношению к прочности на сжатие гипсоцементного камня без доломитовой муки. Однако в целом величина прочности на сжатие гипсоцементного камня с доломитовой мукой выше прочности гипсового камня контрольного состава на 19, 33, 41% при количестве доломитовой муки 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего соответственно.

Таким образом, введение доломитовой муки в состав композиционного гипсового вяжущего способствует формированию более плотной структуры и при компонентном составе КГВ (мас., %): гипс – 51,5; портландцемент – 5,2; доломитовая мука – 10,3; вода – 33; плотность в возрасте 7 сут выше на 19%, прочность на сжатие выше на 41%, прочность на растяжение при изгибе на 29% превышает прочность гипсового камня без минеральной добавки (см. таблицу 3, состав 4).

Исследование влияния золошлаковой смеси на свойства композиционного гипсового вяжущего.

Количество золошлаковой смеси принято равным 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего. Испытания проводились с использованием гипса строительного «Тайфун Мастер» № 35 марки Г5 III. Водогипсовое отношение соответствовало нормальной густоте и было принято постоянным для всех составов: В/Г = 0,6. Определение плотности и прочности КГВ проводилось по ГОСТ 23789²¹ путем испытания образцов-балочек 40×40×160 мм через 7 сут и после высушивания образцов до постоянной массы. Результаты исследований влияния золошлаковой смеси на плотность, водопоглощение и прочностные характеристики композиционного гипсового вяжущего представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Влияние золошлаковой смеси на плотность и прочность КГВ

Номер состава	Компонентный состав, % от массы гипсового вяжущего		Плотность, кг/м ³		Прочность на растяжение при изгибе, МПа (%)		Прочность на сжатие, МПа (%)		Водопоглощение, W _m , %	Общая пористость, %
	золошлаковая смесь	портланд-цемент	в возрасте 7 сут	сухих образцов	в возрасте 7 сут	сухих образцов	в возрасте 7 сут	сухих образцов		
контр.	—	—	2000	1648	2,43 (100)	4,54 (100)	4,40 (100)	8,12 (100)	—	—
1	—	10	1645	1348	3,24 (133)	4,60 (101)	4,02 (91)	10,66 (131)	29,0	0,49
2	5	10	1656	1375	2,93 (121)	4,97 (109)	4,41 (100)	10,30 (127)	22,6	0,48
3	10	10	1637	1387	2,72 (112)	5,00 (110)	4,99 (113)	10,02 (123)	23,7	0,48
4	20	10	1551	1406	2,80 (115)	5,29 (117)	4,34 (99)	10,30 (127)	21,8	0,47

При добавлении в состав КГВ золошлаковой смеси плотность сухих образцов уменьшилась: по сравнению с контрольным составом плотность сухих образцов была меньше на 17% при количестве золошлаковой смеси 5%, на 16% при количестве золошлаковой смеси 10% и на 15% при количестве золошлаковой смеси 20% от массы гипсового вяжущего.

²¹ ГОСТ 23789-2018 Вяжущие гипсовые. Методы испытаний. – М.: Госстандарт, 2019. – 18 с.

Анализ полученных результатов показывает, что при твердении в течение 7 сут в воздушно-сухих условиях введение в состав КГВ золошлаковой смеси приводит к снижению плотности гипсового камня на 17, 18, 22,5% при количестве 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего соответственно. При этом прочность на растяжение при изгибе увеличилась на 21% при количестве золошлаковой смеси 5% от массы гипсового вяжущего и при увеличении количества до 10 и 20% увеличилась соответственно на 12 и 15%. Прочность на сжатие КГВ при добавлении золошлаковой смеси в количестве 10% от массы гипсового вяжущего увеличилась на 13% по сравнению с контрольным составом. В количестве 5% от массы гипсового вяжущего золошлаковая смесь не оказала влияния на прочность на сжатие, она осталась на уровне контрольного образца. Увеличение количества золошлаковой смеси до 20% от массы гипсового вяжущего приводит к снижению прочности на сжатие на 14% по сравнению с составом, содержащим 10% золошлаковой смеси.

После высушивания при температуре 50 ± 5 °С прочность на растяжении при изгибе образцов с количеством золошлаковой смеси 5% от массы гипсового вяжущего увеличилась на 9% по сравнению с контрольным составом. С увеличением содержания золошлаковой смеси прочность на растяжении при изгибе составила 109, 110, 117% при количестве золошлаковой смеси 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего соответственно. Величина прочности на сжатие гипсоцементного камня с золошлаковой смесью выше прочности гипсового камня контрольного состава на 27, 23, 27% при количестве золошлаковой смеси 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего соответственно.

Включение в состав КГВ золошлаковой смеси приводит к уменьшению водопоглощения на 22, 18, 24% при количестве золошлаковой смеси 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего соответственно.

Изменение количества золошлаковой смеси в состав КГВ позволяет регулировать физико-механические свойства. При компонентном составе КГВ (мас., %): гипс – 53,8; портландцемент – 5,4; золошлаковая смесь – 10,8; вода – 30,1. Плотность в возрасте 7 сут ниже плотности гипсового камня на 22%; прочность на сжатие ниже на 1%; прочность на растяжение при изгибе на 15% превышает прочность гипсового камня без добавок; водопоглощение составило 21,8%, что на 25% ниже водопоглощения гипсоцементного вяжущего без добавки золошлаковой смеси.

Оптимизация состава композиционного гипсового вяжущего. Для подбора оптимального состава композиционного гипсового вяжущего применен метод математического планирования эксперимента на основе трехфакторного плана В-D13. В качестве варьируемых факторов принято содержание в составе КГВ, % от массы гипсового вяжущего: золошлаковой смеси (X1), доломитовой муки (X2), портландцемента (X3). После проведения предварительных исследований установлены уровни и интервалы варьирования факторов, которые составили для всех трех факторов: основной уровень (нулевой) – 10% от массы гипсового вяжущего, интервал варьирования – 5% от массы гипсового вяжущего. Для исключения влияния количества воды на свойства композиционного гипсового вяжущего, водогипсовое отношение сохранялось постоянным во всех составах и было равно $В/Г = 0,6$. Испытания проводились с использованием гипса строительного «Тайфун Мастер» № 35 марки Г5 III. План эксперимента в кодированных и натуральных значениях переменных представлен в таблице 5.

Таблица 5. – План эксперимента на основе трехфакторного плана В-D13

Номер опыта	Кодированные значения переменных			Натуральные значения переменных		
	X1	X2	X3	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1	5	5	5
2	+1	-1	-1	15	5	5
3	-1	+1	-1	5	15	5
4	-1	-1	+1	5	5	15
5	-1	0,19	0,19	5	10,95	10,95
6	0,19	-1	0,19	10,95	5	10,95
7	0,19	0,19	-1	10,95	10,95	5
8	-0,29	+1	+1	8,55	15	15
9	+1	-0,29	+1	15	8,55	15
10	+1	+1	-0,29	15	15	8,55

Результаты испытания образцов-балочек $40 \times 40 \times 160$ мм, изготовленных по полученным комбинациям компонентов, позволили получить значения откликов, в качестве которых рассматривались следующие характеристики: предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа; предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, МПа; плотность ρ , кг/м³; водопоглощение W_m , %; пористость P_n , %. Значения откликов определялось через 2 ч с момента затворения гипсового вяжущего водой, в возрасте 7 сут и для сухих образцов. Для каждой точки делали 3 замеса и результаты опытов усредняли. Полученные результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Значения откликов при комбинации компонентов КГВ по плану В-D13

Номер опыта	Предел прочности на сжатие $R_{сж}$, МПа, в возрасте			Предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, МПа, в возрасте			Плотность ρ , кг/м ³			Водопоглощение W_m , %	Пористость, P_n , %
	2 ч	7 сут	в сухом состоянии	2 ч	7 сут	в сухом состоянии	2 ч	7 сут	в сухом состоянии		
1	4,22	5,14	10,0	2,35	2,56	3,27	1672	1594	1356	24,85	33,69
2	4,96	5,59	9,6	3,02	3,49	3,54	1708	1617	1367	23,62	32,49
3	4,55	4,91	9,6	2,68	2,73	3,35	1758	1590	1345	24,11	33,58
4	3,91	4,70	11,4	2,33	2,57	4,33	1754	1586	1410	21,47	29,91
5	5,04	5,42	11,1	2,48	3,00	4,31	1785	1648	1422	22,61	32,86
6	4,10	5,36	12,1	3,24	3,49	4,32	1768	1437	1391	23,10	33,08
7	5,20	4,58	12,6	2,51	2,8	5,21	1773	1629	1426	21,75	30,77
8	4,82	5,23	12,7	3,03	3,11	5,3	1762	1574	1438	19,89	30,49
9	3,99	6,12	11,3	2,23	3,87	4,87	1801	1555	1449	19,84	28,25
10	5,01	5,24	12,2	2,80	2,91	4,83	1789	1547	1468	20,03	29,45

В результате статической обработки опытных данных получены уравнения регрессии влияния рецептурных факторов (таблица 7).

Таблица 7. – Математические модели

Выходной параметр		Математические модели	
Прочность на сжатие	2 ч	$R_{сж2ч} = 4,986 + 0,344 \times x_2 - 0,295 \times x_3 - 0,413 \times x_2^2 - 0,129 \times x_3^2 - 0,027 \times x_1 \times x_2 - 0,371 \times x_1 \times x_3 + 0,211 \times x_2 \times x_3$	(1)
	7 сут	$R_{сж7сут} = 5,211 + 0,22 \times x_1 - 0,109 \times x_2 + 0,265 \times x_3 + 0,397 \times x_1^2 - 0,309 \times x_3^2 - 0,247 \times x_1 \times x_2 + 0,241 \times x_1 \times x_3 + 0,247 \times x_2 \times x_3$	(2)
	в сухом состоянии	$R_{сжсух} = 12,988 + 0,229 \times x_1 + 0,396 \times x_2 + 0,398 \times x_3 - 1,726 \times x_1^2 - 0,425 \times x_2^2 - 0,22 \times x_3^2 + 0,69 \times x_1 \times x_2 - 0,264 \times x_1 \times x_3$	(3)
Прочность на растяжение при изгибе	2 ч	$R_{изг2ч} = 2,791 + 0,043 \times x_1 - 0,324 \times x_1^2 + 0,439 \times x_2^2 - 0,313 \times x_3^2 - 0,244 \times x_1 \times x_2 - 0,071 \times x_1 \times x_3 + 0,051 \times x_2 \times x_3$	(4)
	7 сут	$R_{изг7сут} = 3,272 + 0,28 \times x_1 - 0,169 \times x_2 + 0,23 \times x_3 - 0,082 \times x_2^2 - 0,194 \times x_3^2 - 0,33 \times x_1 \times x_2 + 0,154 \times x_1 \times x_3 + 0,075 \times x_2 \times x_3$	(5)
	в сухом состоянии	$R_{изгсух} = 5,192 + 0,259 \times x_1 + 0,34 \times x_2 + 0,338 \times x_3 - 0,729 \times x_1^2 - 0,599 \times x_2^2 + 0,221 \times x_3^2 + 0,311 \times x_1 \times x_2 - 0,194 \times x_1 \times x_3$	(6)
Плотность	2 ч	$\rho_{2ч} = 1801,474 + 11,508 \times x_1 + 11,746 \times x_2 + 13,609 \times x_3 - 33,097 \times x_2^2 - 22,385 \times x_3^2 - 25,599 \times x_2 \times x_3$	(7)
	7 сут	$\rho_{7сут} = 1554,205 - 28,951 \times x_1 + 17,91 \times x_2 - 20,91 \times x_3 + 60,534 \times x_1^2 - 88,7 \times x_2^2 + 52,005 \times x_3^2 - 44,513 \times x_1 \times x_3 + 26,815 \times x_2 \times x_3$	(8)
	в сухом состоянии	$\rho_{сух} = 1436,141 + 16,788 \times x_1 + 16,772 \times x_2 + 19,962 \times x_3 - 35,118 \times x_2^2 + 23,814 \times x_1 \times x_2 - 13,428 \times x_1 \times x_3$	(9)
Водопоглощение		$W_m = 21,372 - 1,079 \times x_1 - 0,963 \times x_2 - 1,296 \times x_3 + 0,42 \times x_1^2 + 0,681 \times x_2^2 - 0,585 \times x_3^2 - 0,782 \times x_1 \times x_2 + 0,297 \times x_1 \times x_3$	(10)
Пористость		$P_n = 32,308 - 1,45 \times x_1 - 0,667 \times x_2 - 1,235 \times x_3 - 0,529 \times x_1^2 + 0,661 \times x_3^2 - 1,829 \times x_3^2 - 1,16 \times x_1 \times x_2 + 0,395 \times x_2 \times x_3$	(11)

Анализ коэффициентов уравнения регрессии для выходного параметра прочность на сжатие показывает, что совместное использование в составе КГВ всех трех компонентов способствует увеличению прочности на сжатие в сухом состоянии. Максимальное значение прочности на сжатие в сухом состоянии может быть получено при максимальном значении факторов (рисунок 1). Зафиксировав значение фактора $X_1 = 0$, очевиден рост прочности на сжатие при увеличении значений факторов X_2 и X_3 (рисунок 2). Фактор X_2 оказывает наибольшее влияние на прочность на сжатие при значении фактора $X_1 = -1$ и $X_1 = +1$, и наименьшее влияние при значении фактора $X_1 = 0$ (рисунок 3).

В ранний период твердения влияние компонентов не однозначно. Так, если в возрасте 2 ч золошлаковая смесь (X_1) является незначимым фактором, то в возрасте 7 сут и в сухом состоянии присутствие золошлаковой смеси способствует увеличению прочности на сжатие КГВ. С увеличением количества доломитовой муки (X_2) в возрасте 2 ч прочность на сжатие увеличивается, а в возрасте 7 сут – уменьшается. При увеличении количества портландцемента (X_3) в возрасте 2 ч происходит снижение прочности на сжатие, а в возрасте 7 сут портландцемент способствует росту прочности на сжатие (рисунок 4).

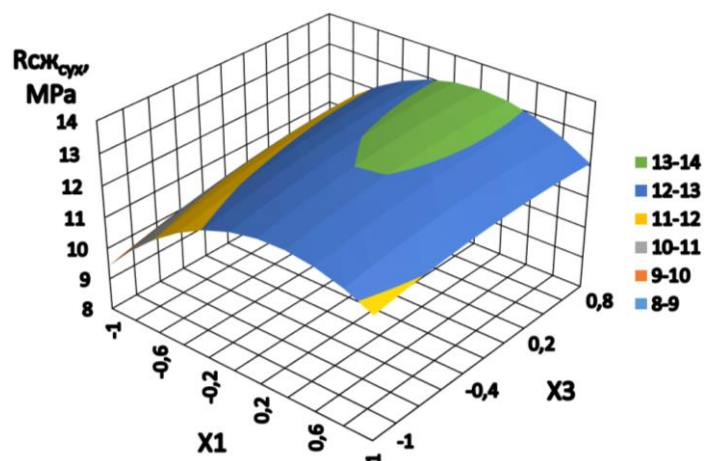


Рисунок 1. – Прочность КГВ на сжатие в сухом состоянии в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = +1

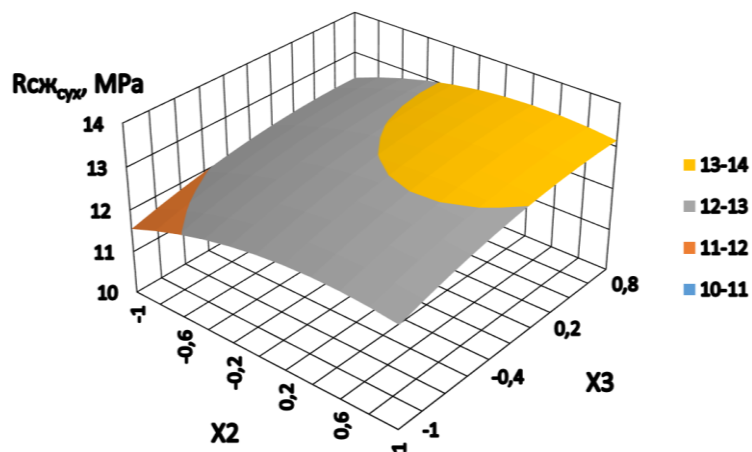


Рисунок 2. – Прочность КГВ на сжатие в сухом состоянии в зависимости от значений факторов X2 (доломитовая мука) и X3 (портландцемент) при значении фактора X1 (золошлаковая смесь) = 0

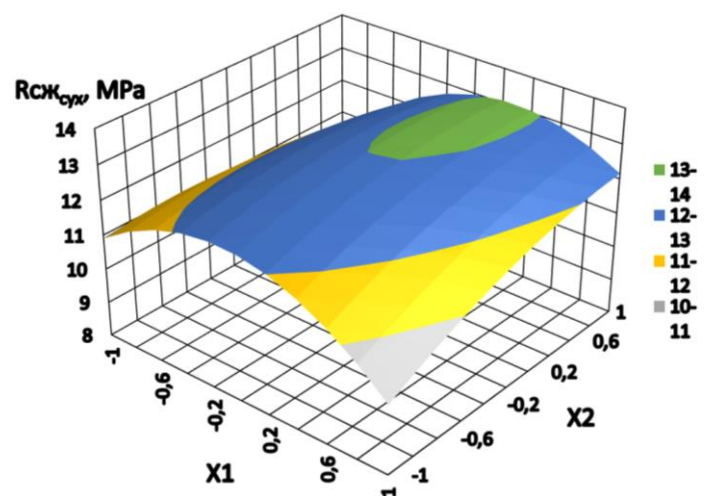


Рисунок 3. – Прочность КГВ на сжатие в сухом состоянии в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X2 (доломитовая мука) при значении фактора X3 (портландцемент) = 0

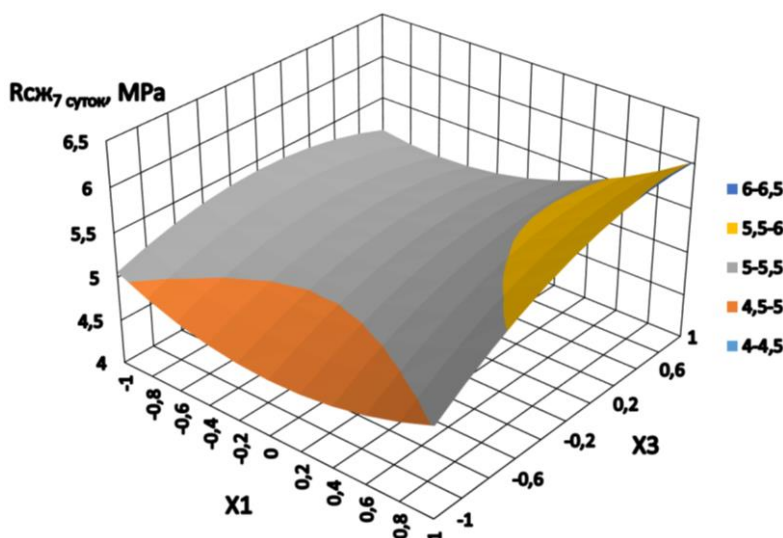


Рисунок 4. – Прочность КГВ на сжатие в возрасте 7 сут в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = 0

Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 2 ч подвержена параболическому влиянию факторов X1, X2, X3, на что указывает наличие значимых квадратичных эффектов в математической модели (4) и только одного основного эффекта фактора X1 (рисунок 5).

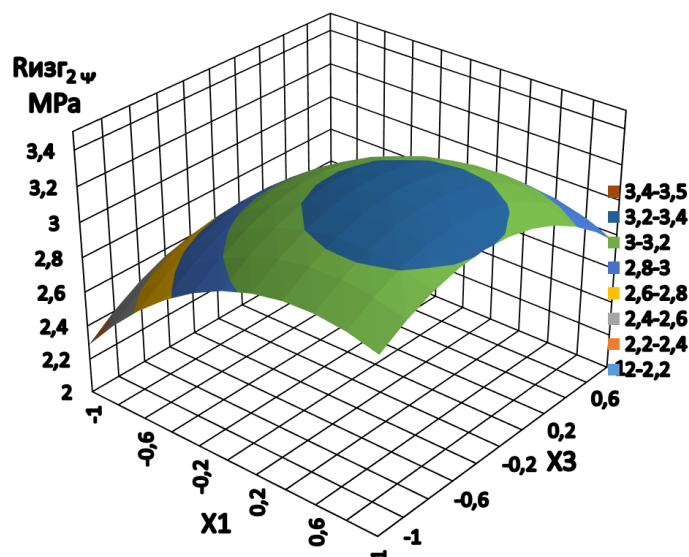


Рисунок 5. – Прочность КГВ на растяжение при изгибе в возрасте 2 ч в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = -1

В возрасте 7 сут преобладает линейное влияние факторов (рисунок 6), в сухом состоянии – параболическое влияние факторов на прочность КГВ на растяжение при изгибе, при этом максимальное значение прочности на растяжение при изгибе достигается при значении фактора X2 = 0 (рисунок 7).

На прочность на сжатие и прочность на растяжение при изгибе образцов в сухом состоянии наименьшее влияние оказывает золошлаковая смесь (X1), на что указывает меньшее значение линейного коэффициента фактора X1 в регрессионных моделях (3) и (6), соответственно, по сравнению со значениями линейных коэффициентов факторов X2 и X3.

Увеличение количества золошлаковой смеси, доломитовой муки и портландцемента в составе КГВ приводит к снижению водопоглощения и пористости, при этом содержание портландцемента (X3) в составе КГВ занимает первое место по влиянию на снижение водопоглощения (рисунок 8).

Факторы X1, X2, X3 оказывают влияние на плотность КГВ. С увеличением их количества плотность увеличивается, на что указывает положительное значение коэффициентов факторов в регрессионной модели (9).

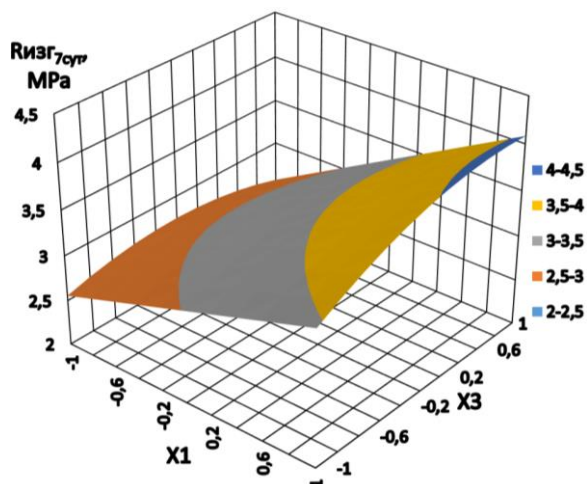


Рисунок 6. – Прочность КГВ на растяжение при изгибе в возрасте 7 сут в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = -1

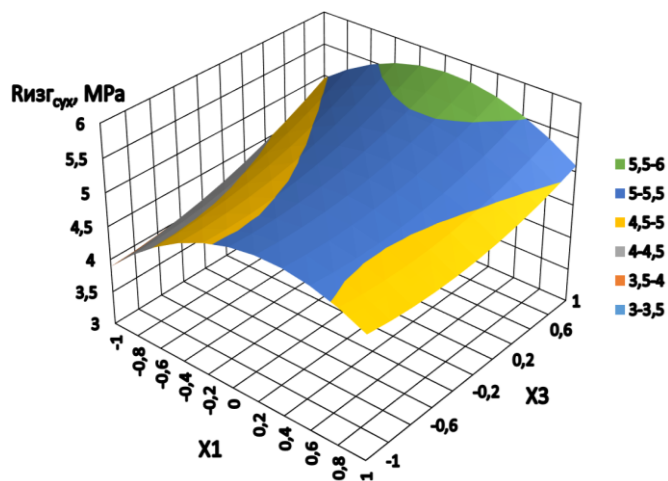


Рисунок 7. – Прочность КГВ на растяжение при изгибе в сухом состоянии в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = 0

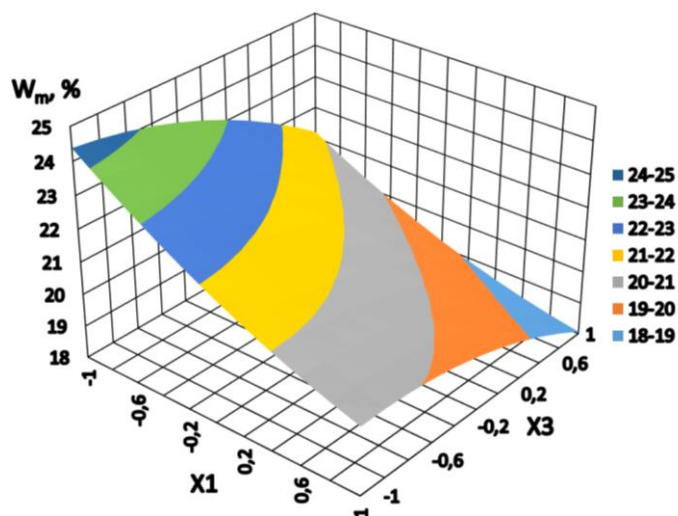


Рисунок 8. – Водопоглощение КГВ в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = +1

Полученные математические модели позволяют провести оптимизацию состава сырьевых компонентов КГВ и выявить закономерности их влияния на физико-механические свойства. Задавая один из интересующих параметров, можно определить состав и спрогнозировать физико-механические свойства КГВ.

Согласно полученным результатам КГВ имеет максимальное значение предела прочности на сжатие в сухом состоянии при постоянном значении фактора $X_3 = +1$. Поверхность отклика в трехмерной системе координат функции предела прочности на сжатие в сухом состоянии $R_{сж,сух}$, МПа, представлена на рисунке 9.

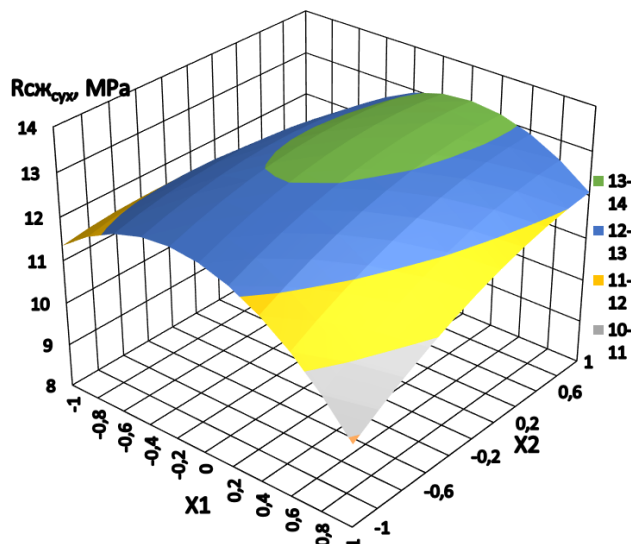


Рисунок 9. – Прочность КГВ на сжатие в сухом состоянии в зависимости от значений факторов X_1 (золошлаковая смесь) и X_2 (доломитовая мука) при значении фактора X_3 (портландцемент) = +1

Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов: $x_1 = -0,091$; $x_2 = 0,335$; $x_3 = 1$. Значение экстремума составляет $R_{сж,сух} = 13,22$ МПа. Компонентный состав КГВ, обеспечивающий получение гипсобетона с максимальной прочностью на сжатие в сухом состоянии (мас., %): гипс строительный – 51; золашлаковая смесь – 4,9; доломитовая мука – 6; портландцемент – 7,6; вода – 30,6.

Физико-механические характеристики гипсобетона на основе КГВ. Для экспериментального определения характеристик гипсобетона были изготовлены образцы-кубики $70 \times 70 \times 70$ мм. Образцы набирали прочность в воздушно-сухих условиях при температуре 20°C . Определение характеристик гипсобетона проводилось в возрасте 7 сут, после высушивания образцов до постоянной массы и в водонасыщенном состоянии. Полученные результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8. – Физико-механические характеристики гипсобетона на основе оптимизированного состава КГВ

Номер образца	Плотность, кг/м^3		Прочность на сжатие, МПа			Коэффициент размягчения	Водопоглощение, %	Пористость, %
	в возрасте 7 сут	в сухом состоянии	в возрасте 7 сут	в сухом состоянии	насыщенных водой			
1	1499	1405	8,76	12,87	5,27	0,41	23,17	47
2	1487	1431	9,91	13,41	6,21	0,46	23,77	46
3	1501	1434	10,11	13,61	6,78	0,46	23,60	45
среднее значение	1496	1423	9,59	13,30	6,09	0,44	23,51	46

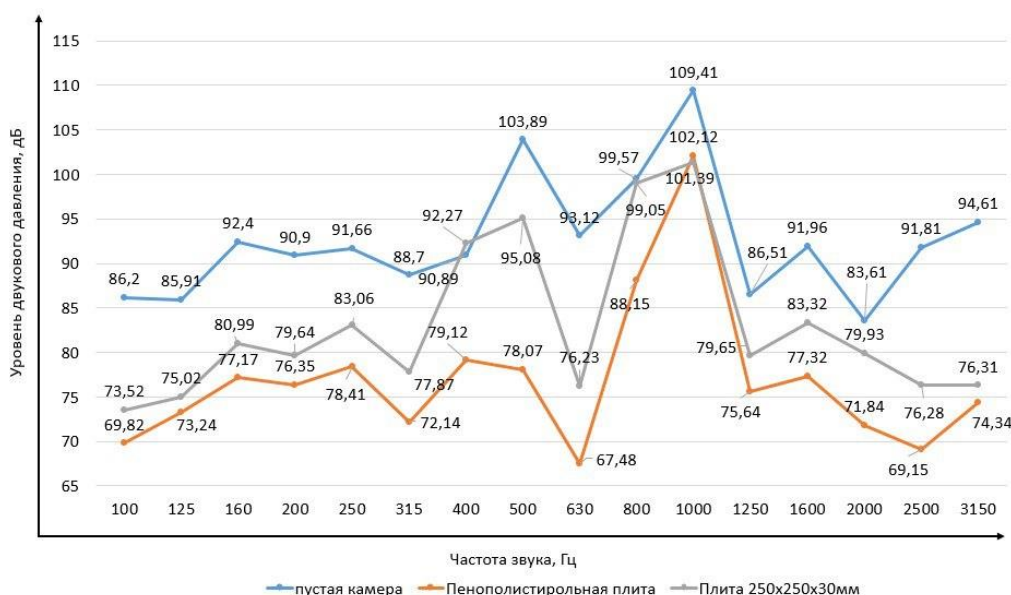
Результаты экспериментальных испытаний показали, что прочность на сжатие гипсобетона в сухом состоянии составила $R_{сж,сух} = 13,30$ МПа, при расчетном значении $R_{сж,сух} = 13,22$ МПа, что указывает на высокую сходимость с результатом расчета и подтверждает достоверность полученной математической модели. На основе оптимизированного состава сырьевой смеси КГВ получен гипсобетон плотностью 1423 кг/м^3 , прочностью на сжатие $13,3$ МПа, коэффициентом размягчения $0,44$, водопоглощением $23,5\%$, пористостью 46% .

Теплопроводность и звукоизоляционные свойства гипсобетона на основе КГВ. Для проведения исследований по определению теплопроводности и звукоизоляционных свойств по СТБ 1618-2006²² были изготовлены и высушены до постоянной массы образцы-плиты размером $250 \times 250 \times 30$ мм. Коэффициент теплопроводности измеряли на приборе ИТП-МГ4. Измерения показали, что коэффициент теплопроводности составляет $0,2898 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

²² СТБ 1618-2006 6 Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме. – М.: Минстройархитектура, 2006. – 12 с.

Звукоизоляционные свойства определялись с помощью учебной акустической камеры. Измерения проводились по уровням звукового давления в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500 и 3150 Гц в соответствии с СН 2.04.01.2020²³.

На первом этапе были выполнены измерения уровня звукового давления в пустой акустической камере («излучающем» отсеке). На следующем этапе акустическая камера разделялась на два отсека перегородкой из пенополистирола, в окно перегородки устанавливался исследуемый образец гипсобетона. Далее выполнялось изменение частоты и фиксировался уровень звукового давления в отсеке, отделенном от источника звукового сигнала перегородкой с исследуемым материалом («принимающем» отсеке). Эффективность звукоизоляционных свойств материала оценивалась по показателю снижения уровня звукового давления в «принимающем» отсеке по сравнению с уровнем звукового давления с «излучающем» отсеке. Результаты измерения звукоизоляционных свойств представлены на рисунке 10.



1 – без панели; 2 – с панелью из гипсобетона;
3 – с панелью из экструдированного пенополистирола

Рисунок 10. – Зависимость уровня звукового давления от частоты в камере

Анализ полученных результатов показывает, что гипсобетонная перегородка, изготовленная из КГВ, толщиной 30 мм, в диапазоне частот 100 до 300 Гц обеспечивает снижение уровня шума до 12,7 дБ.

Заключение. Таким образом, включение в состав КГВ портландцемента, золошлаковых отходов и доломитовой муки позволяет регулировать реологические и физико-механические свойства. Установлено, что портландцемент в составе КГВ приводит к увеличению прочности, доломитовая мука способствует уплотнению структуры, золошлаковая смесь снижает плотность без снижения прочности.

Выполненные с использованием метода математического планирования эксперимента исследования физико-механических свойств КГВ показали совместимость сырьевых компонентов и возможность получения гипсобетонов с заданными свойствами путем подбора содержания компонентов на основе разработанных математических моделей. Отмечено, что, изменяя содержание золошлаковой смеси, доломитовой муки, портландцемента в составе КГВ, можно изменять физико-механические характеристики: прочность на сжатие от 9,4 МПа до 13,2 МПа, прочность на растяжение при изгибе от 3,2 МПа до 5,7 МПа, плотность от 1345 кг/м³ до 1468 кг/м³, водопоглощение от 18,2% до 24,4%.

На основе полученных математических моделей разработан состав композиционного гипсового вяжущего (мас., %): гипс строительный – 51; золошлаковая смесь – 4,9; доломитовая мука – 6; портландцемент – 7,6; вода – 30,6, который позволяет получить гипсобетон плотностью 1423 кг/м³, прочностью на сжатие 13,3 МПа, водопоглощением 23,5%, коэффициентом размягчения 0,44, коэффициентом теплопроводности 0,2898 Вт/(м·°С). Разработанный состав сырьевой смеси КГВ может быть рекомендован для изготовления стеновых блоков для эксплуатации в зданиях с относительной влажностью воздуха не более 60%.

²³ СН 2.04.01.2020 Защита от шума. – Минск: Минстрой архитектуры, 2020. – 52 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества: учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1986. – 463 с.
2. Башкатов Н.Н. Минеральные воздушные вяжущие вещества: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 148 с.
3. Effective composites employing fast-hardening gypsum cement binders for additive manufacturing / N.V. Chernysheva, V.S. Lesovik, E.S. Glagolev et al. // *Advances in Engineering Research (Actual Issues of Mechanical Engineering AIME 2017)*. – 2017. – Vol. 133. – P. 135–141. DOI: 10.2991/aime-17.2017.23.
4. Музаев С.-А.Ю., Чернышева Н.В., Аласханов С.Х. Использование золошлаковых смесей ТЭЦ для производства композиционных гипсовых вяжущих // *Экология и промышленность России*. – 2013. – № 7. – С. 26–29. DOI: 10.18412/1816-0395-2013-7-26-29.
5. Халиуллин М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р. Состав и структура камня композиционного гипсового вяжущего с добавками извести и молотой керамзитовой пыли // *Вестн. МГСУ*. – 2013. – № 12. – С. 109–117. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.12.109-117.
6. Глаголев Е.С., Воронов В.В. Композиционное вяжущее с использованием опокovidного мергеля и пенобетонных смесей для монолитного строительства // *Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2018. – № 8. – С. 109–116. DOI: 10.12737/article_5b6d586da74f79.11389696.
7. Prospects for effective use of dolomite in concrete compositions / V. Vaganov, A. Kireev, S. Avdeev et al. // *Constuction Science*. – 2016. – Vol. 19. – P. 27–32. DOI: 10.1515/CONS-2016-0008.
8. Парфенова Л.М., Разуева Е.А. Кинетика твердения золошлакощелочного вяжущего // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Стр-во. Приклад. науки*. – 2019. – № 16. – С. 35–40.

REFERENCES

1. Volzhenskii, A.V. (1986). *Mineral'nye vyazhushchie veshchestva*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
2. Bashkatov, N.N. (2018). *Mineral'nye vozdushnye vyazhushchie veshchestva*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta. (In Russ.).
3. Chernysheva, N.V., Lesovik, V.S., Glagolev, E.S. & Volodchenko, A.A. (2017). Effective composites employing fast-hardening gypsum cement binders for additive manufacturing. *Advances in Engineering Research (Actual Issues of Mechanical Engineering AIME 2017)*, (133), 135–141. DOI: 10.2991/aime-17.2017.23.
4. Murtazaev, S.-A.Yu., Chernysheva, N.V. & Alaskhanov, A.N. (2013). Usage of bottom ashes mixtures of CHP for manufacturing of composite gypsum binders (CGB). *Ecology and Industry of Russia*, (7), 26–29. DOI: 10.18412/1816-0395-2013-7-26-29. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Khaliullin, M.I., Rakhimov, R.Z. & Gaifullin, A.R. (2013). Sostav i struktura kamnya kompozitsionnogo gipsovogo vyazhushchego s dobavkami izvesti i molotoi keramzitovoi pyli [Composition and structure of the stone composite gypsum binder with additives of lime and the ground haydite dust]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, (12), 109–117. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.12.109-117. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Glagolev, E.S. & Voronov, V.V. (2018). Kompozitsionnoe vyazhushchee s ispol'zovaniem opokovidnogo mergelya i penobetonnykh smesei dlya monolitnogo stroitel'stva [Composite bonding with the use of the overcape mergel and foam concrete mixtures for monolithic construction]. *Vestn. BGTU im. V.G. Shukhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]*, (8), 109–116. DOI: 10.12737/article_5b6d586da74f79.11389696. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Vaganov, V., Kireev, A., Avdeev, S., Šahmenko, G. & Šinka, M. (2016). Prospects for effective use of dolomite in concrete compositions. *Constuction Science*, (19), 27–32. DOI.ORG/10.1515/CONS-2016-0008.
8. Parfenova, L.M. & Razueva, E.A. (2019). Kinetika tverdeniya zoloshlakoshchelochnogo vyazhushchego [Hardeningkinetics of alkali activated ash and slag binder]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, (16), 35–40. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 13.12.2023

COMPOSITE GYPSUM BINDER USING DOLOMITE FLOUR AND ASH AND SLAG WASTE

M. TOLMACH, N. RASCHINSKY, L. PARFENOVA
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article presents the results of studies of the physical and mechanical properties of a composite gypsum binder containing ash and slag mixture, dolomite flour and portland cement. Mathematical models of the influence of recipe factors on the basic physical and mechanical properties of CGB, compressive strength, tensile strength in bending, density, water absorption and porosity have been obtained, allowing to optimize the composition of the raw materials of the composite gypsum binder. It has been shown that by changing the content of prescription factors in the composition of the CGB, it is possible to vary the physical and mechanical characteristics: compressive strength in the range from 9,4 MPa to 13,2 MPa, tensile strength in bending – from 3,2 MPa to 5,7 MPa, density – from 1345 kg/m³ to 1468 kg/m³, water absorption – from 18,2% to 24,4%. Based on the optimized composition of the CGB raw material mixture, gypsum concrete with a compressive strength of 13,3 MPa and a softening coefficient of 0,44 was obtained, which can be used for the manufacture of wall blocks.

Keywords: composite gypsum binder, ash and slag waste, dolomite flour, composition optimization, physical and mechanical properties, gypsum concrete.

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.061.4:004(082)

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-79-86

СРАВНЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ГРАВИТИРУЮЩИХ ТЕЛ СРЕДСТВАМИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ARCGIS И PYTHON-БИБЛИОТЕКИ SCIPY

П.С. ДОЛГИЙ, канд. техн. наук И.П. ШЕВЕЛЕВ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Статья является продолжением исследования вопроса оценки влияния вариаций гравитационного поля (ВГП) Земли на результаты повторного нивелирования с использованием современных средств геопространственного анализа при наблюдении за деформациями природных и инженерных объектов. Отражены основные проблемы, возникающие при выполнении расчета объемов средствами ArcGIS. Предложена новая методика расчета поправок за ВГП с использованием python-библиотеки *scipy.spatial*. Доказана нецелесообразность выполнения «замыкания» объектов *Multipatch* с помощью инструмента *Enclose Multipatch*. Выполнено сравнение объемов, рассчитанных с «замыканием» и без «замыкания», а также для «замкнутых» объектов – объемов, рассчитанных встроенными средствами ArcGIS и с использованием python-библиотек. Установлена связь искажения объемов при расчете разными методами с сопутствующим изменением площади поверхности объекта, количества вершин и размера по оси Z. Выполнено сравнение поправок за ВГП, рассчитанных с использованием python-библиотек, с рассчитанными ранее встроенными средствами ArcGIS. Апробирование методики выполнено на реальных данных моделей конусов Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) на полуострове Камчатка.

Ключевые слова: вариации гравитационного поля, повторное нивелирование, геопространственный анализ, конечно-элементное разбиение, программирование на языке python.

Введение. На Земле непрерывно происходят процессы различного генезиса, вызывающие перераспределение вещества, в результате чего гравитационное поле меняется с течением времени.

При проведении большинства видов геодезических работ приборы устанавливаются в горизонтальное положение относительно отвесной линии, а значит, её уклонение, которое также меняется вместе с гравитационным полем, неизбежно вносит погрешности в результаты измерений. Особенно это обстоятельство необходимо учитывать при производстве высокоточного нивелирования на геодинамических полигонах.

Анализ показывает, что при всех особенностях протекания у природных и техногенных процессов, связанных с перераспределением масс, вызывающих ВГП, обнаруживаются общие черты. Например, в сходстве форм рельефа: терриконы и отвалы пород напоминают конусы вулканов, а просадки поверхности техногенного характера часто бывает непросто отличить от карстовых и суффозионных просадок естественного характера. Все эти формы рельефа характеризуют геометрические тела схожей формы, близкие к конусу и усеченному конусу.

Изменение потенциала тяготения вычисляют методом численного интегрирования, разбивая гравитирующее тело на элементарные объемы по формуле (1).

$$\delta_{u(k)} = \frac{G * \rho \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \tau_i}{r_{ik}^2}}{\gamma_k}, \quad (1)$$

где $\Delta \tau_i$ – элементарный объем;

r_{ik} – текущее расстояние от исследуемой точки k до элементарного объема;

γ_k – нормальная сила тяжести в исследуемой точке.

Среди известных алгоритмов разбиения вызывающих ВГП масс можно выделить алгоритмы, основанные на круговой палетке Еремеева [Остач, 1984], а также алгоритм аппроксимации конусовидных тел, представленный Б.Т. Мазуровым [1], подходящий для конусов с основанием, близким к правильному кругу. Как правило, эти алгоритмы не предполагают использование ГИС-технологий. Применение средств автоматизации может существенно повысить точность конечного результата [2].

В наши дни средства трехмерного геопространственного анализа позволяют получать максимально достоверную цифровую модель форм рельефа и вычислять объем сложного тела с достаточно высокой точностью. Но для решения данной конкретной задачи требуется не столько общий объем тела, массы которого вызывают ВГП, сколько слагающие это тело элементарные объемы. В связи с чем закономерно возникает вопрос, каким образом разбивать изучаемую форму тела: какую геометрическую фигуру положить в основу построения элементарных объемов, какой шаг разбиения выбрать [2].

В предыдущей статье [2] автором выполнено сравнение радиальной (в основании элементарного объема лежит сектор) и прямоугольной (в основании – квадрат) моделей разбиения конусовидного тела – квазиконуса. Выбор сделан в пользу прямоугольной модели ввиду ее меньшей трудоемкости. При этом и построение трехмерной модели гравитирующих тел с разбиением их на элементарные объемы, и расчет геометрических показателей (объем, координаты центра масс) производились в среде ArcGIS. Апробирование методики производилось на примере данных о накоплении породы в конусах Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения (далее – БТТИ) на полуострове Камчатка 1975–1976 годов. Исходные данные были представлены в виде

бумажной карты изопахит в монографии С.А. Федотова [3]. Карта была отсканирована, привязана с помощью космического снимка на данную территорию и переведена в векторный вид (рисунок 1).

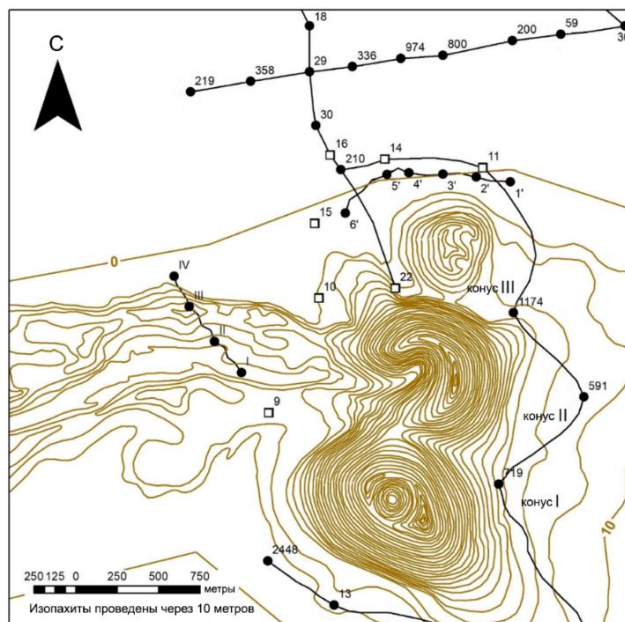


Рисунок 1. – Карта конусов Северного прорыва БТИ, построенная и изопахитах; нивелирные профили [4]

Вычисление объемов тел в ArcGIS и scipy. Построение моделей элементарных объемов выполнялось путем вытягивания (экструдирования) регулярной полигональной сетки между парами поверхностей, предварительно построенных с необходимым шагом. Вычисление объемов производилось с помощью инструмента Add Z Information набора инструментов 3D Feature Class.

В процессе выполнения данной работы в ArcGIS был выявлен ряд проблем.

1. Работа инструмента Extrude between при значительном количестве создаваемых элементарных объемов часто завершается с ошибкой, при этом требуемый файл на диске создается. Такая ситуация позволяет продолжить расчеты в ручном режиме, но серьезно усложняет разработку инструмента автоматизации расчета.

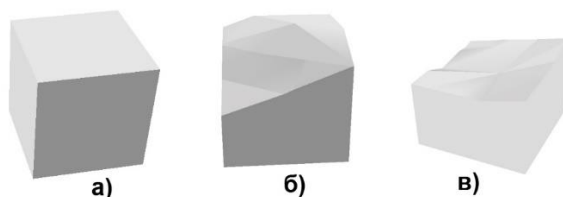
2. Часть построенных таким образом тел имеют неверное значение объема.

3. В результате работы инструмента Extrude between значительная часть элементарных объемов получаются «незамкнутыми», для которых невозможен расчет геометрических показателей. «Замыкание» объектов Multipatch с помощью инструмента Enclose Multipatch занимает значительное время и не всегда приводит к желаемому результату: процедура замыкания искажает реальный объем тел; в результате «замыкания» часть объектов всё равно остаются «незамкнутыми».

4. В процессе расчета геометрических показателей с помощью инструмента Add Z Information происходит заикливание программы на определенных объектах. Проблема решается только их удалением. Это искажает конечный результат и также усложняет разработку автоматизированного инструмента.

В связи с этим очевидна необходимость поиска альтернативных инструментов для построения элементарных объемов и расчета геометрических показателей. При этом следует отметить, что в этих расчетах важна роль атрибутивной информации, например, данных о плотности породы в элементарном объеме. Следовательно, для хранения моделей элементарных объемов необходим формат, поддерживаемый геоинформационными продуктами. Именно к таким форматам и относится shape-файл типа Multipatch.

В таком случае предлагаем отделить построение модели элементарных объемов от расчета геометрических показателей. После получения файлов Multipatch в ArcGIS, расчеты будем производить с помощью python-библиотек. Среди библиотек, позволяющих работать с объемными телами, отметим scipy.spatial. Построить объемное тело по массиву точек позволяет класс ConvexHull, а объем и другие геометрические показатели (такие как площадь поверхности) полученного тела вычисляются с помощью соответствующих свойств. Например, для объема: ConvexHull(<array_of_points>).volume, где <array_of_points> – массив точек. Библиотека возвращает объем объекта Multipatch вне зависимости от того, является ли он «замкнутым». Таким образом, необходимость выполнения «замыкания» моделей элементарных объемов встает под сомнение. С целью проверить необходимость «замыкания» выполним аналогичные расчеты для «замкнутых» и для «незамкнутых» объектов Multipatch. В качестве тестового образца возьмем слой элементарных объемов для конусов Северного прорыва БТИ со значениями координаты Z от 50 до 100. Данный образец содержит элементарные объемы разных форм: правильные кубы, находящиеся в центре крупных конусов I и II, частично скошенные кубы, находящиеся на склонах больших конусов, полностью скошенные кубы, находящиеся на вершине малого конуса III (рисунок. 2, табл. 1).



а) – в форме правильного куба; б) – частично скошенный; в) – полностью скошенный

Рисунок 2. – Вид моделей элементарных объемов

Таблица 1. – Некоторые геометрические характеристики представленных моделей элементарных объемов

Позиция на рисунке 2	Объем, м ³	Площадь поверхности, м ²	Размер по оси Z, м
а)	125000	15000	50
б)	105949	2983	50
в)	77230	2563	38

И площадь поверхности, и объем любого геометрического тела выражаются через одни и те же величины, а значит, зависят друг от друга [4]. Например, для куба:

$$\frac{S}{V} = \frac{6a^2}{a^3} = \frac{6}{a}, \quad (2)$$

где S – площадь поверхности;
V – объем,
a – длина ребра куба.

Так как объем куба выражается через более высокую, чем площадь поверхности, степень, отношение площади к объему не постоянно для геометрически подобных тел, а зависит от их размеров. Значения объема при увеличении размеров тела растут гораздо быстрее. По мере усложнения геометрического тела, увеличения количества его вершин и граней, формулы для расчета объема и площади поверхности становятся сложнее. При этом увеличивается и отношение площади поверхности к объему. В компьютерных программах, как правило, объем тела вычисляется с помощью разбиения его на элементарные треугольные пирамиды, для каждой из которых вычисляются три вектора и объем которых находится по формулам смешанного произведения векторов [4]. При этом важно выбрать оптимальный алгоритм такого разбиения. Бесспорно утверждение, что получаемые в результате вычислений объемы и площади поверхности для одного и того же тела должны оставаться неизменными вне зависимости от алгоритма. Однако практика показывает, что при кажущейся простоте и универсальности алгоритма результаты расчета объемов и площадей поверхности в различных программах различаются.

Обсуждение результатов. Вычислим объемы для «замкнутых» объектов с помощью ArcGIS и с помощью библиотеки `scipy.spatial` и приведем срез полученных результатов для их сравнения (таблица 2).

Таблица 2. – Срез результатов, полученных при расчетах геометрических показателей встроенными средствами ArcGIS и с помощью python-библиотеки

Полученные с помощью встроенных средств ArcGIS			Полученные с помощью python-библиотеки <code>scipy.spatial</code>		
V, м ³	S, м ²	S/V	V, м ³	S, м ²	S/V
51272,6	9139,0	0,18	34054,6	7393,3	0,22
29974,4	7811,4	0,26	31785,4	7314,3	0,23
23257,7	7203,5	0,31	16707,3	6228,2	0,37
25768,5	7489,0	0,29	24037,2	6788,3	0,28
33822,4	7746,4	0,23	35024,5	7638,0	0,22
50200,4	9821,8	0,20	37750,8	7904,8	0,21
35411,2	9088,5	0,26	32927,5	7314,6	0,22
35913,2	8057,8	0,22	36657,6	8075,8	0,22
39807,1	8356,0	0,21	40432,2	8375,4	0,21
36016,9	8069,0	0,22	36550,6	8079,9	0,22
23849,9	7148,5	0,30	26334,0	7194,4	0,27
30384,1	8357,4	0,28	27735,7	7149,9	0,26
39350,9	8340,3	0,21	22985,4	6651,9	0,29
61585,0	11157,8	0,18	71307,0	10497,3	0,15
55045,3	10913,4	0,20	56064,2	9642,5	0,17
76711,2	11411,8	0,15	77043,6	11194,1	0,15

Можно заметить, что значения объема, вычисленные с помощью ArcGIS, чаще всего оказываются большими, чем вычисленные с помощью python. При этом значения правильных кубов вычисляются корректно. Встречаются объекты, которые библиотека `scipy.spatial` воспринимает как ошибочные и не вычисляет объем, в то время как результат вычисления в ArcGIS выглядит корректным. Для более тщательного рассмотрения таких объектов выведем все координаты его вершин в консоль и рассчитаем размер по оси Z. Для всех таких объектов размер по оси Z

получился равным 0, следовательно, все вершины лежат в одной плоскости и рассматриваемый объект не имеет объема. Данный факт может говорить о более высокой степени доверия результатам вычислений с помощью библиотеки `scipy.spatial`. Что касается отношения площади к объему, то для некоторых объектов значения получились близкими между собой, но для отдельных – отличия значительные. Вычислим разности полученных величин для двух методов расчета и отобразим графически их взаимосвязь, чтобы понять, искажение какой именно величины вызывает искажение объема. Для визуализации будем использовать библиотеку `Matplotlib`, которая является одной из лучших библиотек для визуализации данных¹ [5; 6; 7].

$$\Delta V = V_{arc} - V_{py}; \quad (3)$$

$$\Delta S = S_{arc} - S_{py}; \quad (4)$$

$$\Delta N = N_{arc} - N_{py}; \quad (5)$$

$$\Delta Z = Z_{arc} - Z_{py}, \quad (6)$$

где ΔV , ΔS , ΔN , ΔZ – разность объемов, площадей поверхности, количества вершин, размера по оси Z соответственно;

V_{arc} , S_{arc} , N_{arc} , Z_{arc} – величины, рассчитанные встроенными средствами ArcGIS;

V_{py} , S_{py} , N_{py} , Z_{py} – величины, рассчитанные с помощью библиотеки `scipy.spatial`.

Рассмотрим графики зависимости разностей объема от разности площади поверхности объектов, количества вершин и размера по оси Z (рисунок 3). Для зависимости разности объемов от разности площади поверхности можно сделать вывод, что по мере усложнения конфигурации объекта разность объемов, рассчитанных с помощью ArcGIS и `scipy.spatial`, увеличивается, хотя и значительная часть значений разности объемов концентрируется около нуля. Для зависимости от количества вершин – также значительная часть значений разности объемов концентрируется около нуля, но некоторая часть растянулась до значений 50000 м³ и более, при этом большинство значений количества вершин не превышают 250 шт. Для размера по оси Z можно заметить, что большинство объектов с разностью объемов более 5000 м³ имеют размер по оси Z 50 м, но разность объемов не нулевая на всем промежутке от 0 до 50. Таким образом, прослеживается зависимость только разности объемов с разностью площади поверхности.

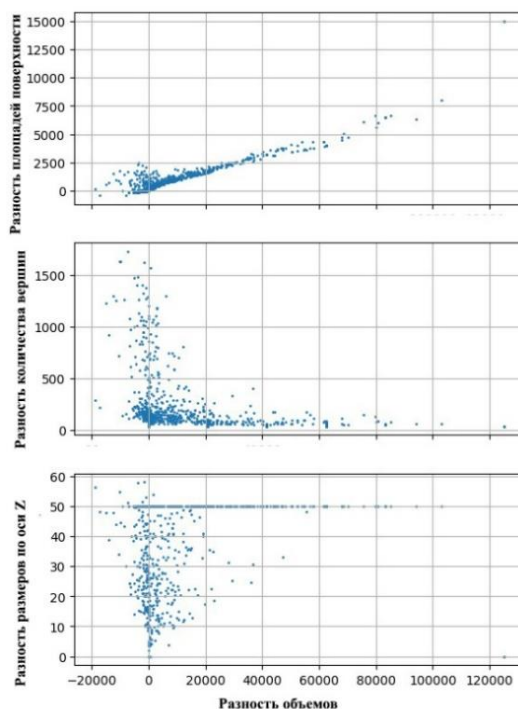


Рисунок 3. – Графики зависимости разностей объемов, рассчитанных двумя различными методами: встроенными средствами ArcGIS и с помощью библиотеки `scipy.spatial`, от разностей других геометрических показателей: площади поверхности, количества вершин, размера по оси Z

¹ Konshina M.M., Kryltcov S.B. Visualization of geospatial data using Python // The latest research in modern science: experience, traditions and innovations: Collected scientific articles of the IX International scientific conference / Сб. науч. ст. по материалам IX Междунар. науч. конф., Morrisville, NC, USA, 20–21 июня 2019 г. – Morrisville, NC, USA: Lulu Press, 2019. – Р. 11–14.

Язык программирования Python в научных вычислениях / А.Г. Савина, Л.И. Малявкина, Ю.Я. Герасимова и др. // Инфраструктура цифрового развития образования и бизнеса: сб. науч. тр. нац. науч.-практ. конф., Орел, 01–30 апр. 2021 г. / Под ред. Л.И. Малявкиной. – Орел: Орловский гос. ун-т экономики и торговли, 2021. – С. 64–69.

Учитывая описанные ранее проблемы, возникающие при «замыкании» объектов Multipatch с помощью инструмента Enclose Multipatch, проведем сравнение геометрических показателей объектов, рассчитанных с помощью библиотеки `scipy.spatial`, для «незамкнутых» и «замкнутых» объектов с целью оценить целесообразность выполнения «замыкания» для расчета объемов.

Рассчитаем для «незамкнутых» и «замкнутых» объектов следующие геометрические показатели: объем, площадь поверхности, количество вершин, разность максимальной и минимальной координат по оси Z (размер по оси Z). Приведем срезы полученных результатов (таблица 3).

Таблица 3. – Сравнение результатов расчета геометрических показателей моделей элементарных объемов до «замыкания» и после «замыкания»

«Незамкнутые»					«Замкнутые»				
V, м ³	S, м ²	N	Z, м	S/V	V, м ³	S, м ²	N	Z, м	S/V
25873,8	6822,4	186	23,5	0,26	34054,6	7393,3	264	20,5	0,22
19488,8	6520,7	168	17,1	0,33	31785,4	7314,3	1016	17,1	0,23
17732,4	6447,9	118	14,5	0,36	16707,3	6228,2	278	14,5	0,37
11464,4	5889,3	110	15,9	0,51	24037,2	6788,3	682	15,9	0,28
11315,0	5642,4	108	16,1	0,50	35024,5	7638,0	1008	16,0	0,22
28595,2	6945,8	156	33,9	0,24	37750,8	7904,8	400	31,1	0,21
29002,7	7393,7	168	27,9	0,25	32927,5	7314,6	1012	26,3	0,22
36657,6	8075,8	170	25,5	0,22	36657,6	8075,8	210	25,5	0,22
40432,2	8375,4	136	26,2	0,21	40432,2	8375,4	168	26,2	0,21
36550,6	8079,9	118	26,3	0,22	36550,6	8079,9	144	26,3	0,22
26334,0	7194,4	148	22,1	0,27	26334,0	7194,4	180	22,1	0,27
22068,5	6510,9	132	22,1	0,30	27735,7	7149,9	910	20,5	0,26
20704,6	6468,3	80	23,2	0,31	22985,4	6651,9	190	22,4	0,29
35679,2	7615,5	220	44,9	0,21	71307,0	10497,3	1630	44,5	0,15
49943,0	9034,3	166	37,4	0,18	56064,2	9642,5	1264	39,3	0,17
77043,6	11194,1	144	47,2	0,15	77043,6	11194,1	186	47,2	0,15

Можно заметить, что размер по оси Z после «замыкания» для большинства объектов значительно не изменился, однако количество вершин, площадь поверхности и объем увеличились значительно, а иногда – в несколько раз. При этом, если рассмотреть срез для объектов правильной формы (объем 125000 м³, площадь поверхности 15000 м², размер по оси Z 50 м), то можно заметить, что для них изменилось только количество вершин, которое и до «замыкания» было избыточным. Изначальная «избыточность» объясняется тем, что при экструдировании полигонов между поверхностями в объект включаются узловые точки поверхностей, которые, в свою очередь, построены по векторным данным.

Далее попытаемся понять, какой именно геометрический показатель влияет на искажение объема (рисунок 4). Для этого вычтем из показателей для «замкнутых» объектов показатели для «незамкнутых» и построим графики зависимости для разностей объема с разностью каждого из показателей.

$$\Delta V = V_e - V_{ne}; \quad (7)$$

$$\Delta S = S_e - S_{ne}; \quad (8)$$

$$\Delta N = N_e - N_{ne}; \quad (9)$$

$$\Delta Z = Z_e - Z_{ne}, \quad (10)$$

где $\Delta V, \Delta S, \Delta N, \Delta Z$ – разность объемов, площадей поверхности, количества вершин, размера по оси Z соответственно;

V_e, S_e, N_e, Z_e – величины, рассчитанные до «замыкания» объектов Multipatch;

$V_{ne}, S_{ne}, N_{ne}, Z_{ne}$ – величины, рассчитанные после «замыкания» объектов Multipatch.

Можно заметить, что изменение объема имеет выраженную линейную зависимость от изменения площади поверхности. Выраженной зависимости от количества вершин и размера по оси Z не прослеживается. Поскольку «замыкание» объектов искажает объем, применение «замыкания» можно считать нецелесообразным, а расчеты на python «незамкнутых» объектов – более достоверными.

Используя рассчитанные с помощью python объемы, рассчитаем значения поправок за ВГП для двух нивелирных профилей и сравним их с вычисленными ранее с помощью встроенных средств ArcGIS.

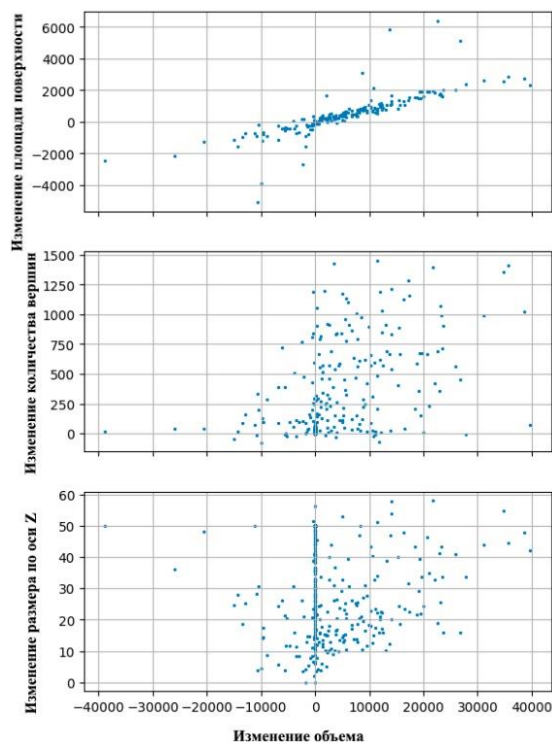


Рисунок 4. – Графики зависимости изменения объема при «замыкании» объектов Multipatch от изменения площади поверхности, количества вершин и размера по оси Z

Расчеты по превышениям на каждой станции нивелирных секций для профилей I-IV и 1'-6' (см. рисунок 1, формулу 1) даны в таблице 4. Результаты этого расчета нам представляются более строгими как максимально соответствующие природе влияния ВГП согласно методике геометрического нивелирования. В данном случае оценивается влияние ВГП отдельно на отсчеты по задней и передней рейкам, а их разности, соответственно, – как влияние на превышение на станции. Суммарное влияние ВГП на превышения по секции будет складываться из накопления влияний на превышения по станциям, а затем в каждый репер – как накопление влияний в превышения по секциям относительно начального репера профиля, принятого за исходный.

Таблица 4. – Сравнение влияния ВГП на нивелирные профили I-IV и 1'-6', рассчитанные по превышениям на станции встроенными средствами ArcGIS и с помощью библиотеки scipy.spatial

Репер	Расчет в ArcGIS		Расчет на Python	
	Поправка δ_h за ВГП в превышение в мм	δ_h	Поправка δ_h за ВГП в превышение в мм	δ_h
Профиль I-IV				
I		0,0		0
II	0,698	0,698	0,491	0,491
III	0,533	1,231	0,376	0,867
IV	0,317	1,548	0,148	1,015
Профиль 1'-6'				
1'		0,0		0
2'	-0,186	-0,186	-0,093	-0,093
3'	-0,058	-0,244	-0,025	-0,118
4'	0,112	-0,132	0,068	-0,050
5'	0,075	-0,057	0,043	-0,007
6'	-0,350	-0,407	-0,280	-0,287

Можем заметить, что значения поправок для всех реперов, вычисленные с помощью библиотеки `scipy.spatial`, получились меньше, чем вычисленные с помощью ArcGIS, что, учитывая уже отмеченные ранее искажения объема при расчете средствами ArcGIS, вполне ожидаемо.

Заключение. Приведенные в таблице 4 поправки следует действительно воспринимать как влияние ВГП за счет перераспределения масс (образование конусов и провалов в районе БТТИ) в отметки реперов относительно исходного репера профиля; их значения меньше, чем абсолютные значения влияния ВГП на каждом из реперов.

Оценку влияния ВГП на результаты высокоточного нивелирования следует согласовывать с методикой геометрического нивелирования, так как реальные поправки за гравитационные изменения в отметку репера могут оказаться меньше, чем вызванное ВГП смещение уровневой поверхности на оцениваемом репере.

Расчет объема объекта типа `Multipatch` с помощью `python`-библиотек вызывает большее доверие, чем расчет с помощью встроенных функций ArcGIS, поскольку в результате получается меньше неожиданных результатов. В большинстве случаев ArcGIS завышает значения объема.

Применение процедуры «замыкания» объектов `Multipatch` приводит к искажению объемов и площадей поверхности, увеличению количества вершин, таким образом внося шум в данные и увеличивая занимаемые ими объемы памяти. Без «замыкания» невозможен расчет объемов встроенными средствами ArcGIS, однако оно не требуется для расчетов с помощью библиотеки `scipy.spatial`. Поэтому применение процедуры «замыкания» при расчете объемов с помощью `python` представляется нецелесообразным.

В ходе данной работы нами рассчитана разность объемов: с помощью `python` для объектов до выполнения процедуры «замыкания» и после; для расчетов встроенными средствами ArcGIS и с помощью `python`. Также проанализировано сопутствующее изменение площади поверхности тела, количества составляющих его вершин и размера по оси *Z*. Явная статистическая связь установлена только между разностью объемов и разностью площадей поверхности.

Поправки за вариации гравитационного поля, вычисленные с помощью `python`-библиотеки, получились меньше, чем вычисленные встроенными средствами ArcGIS.

В заключение можно сказать, что вопрос вычисления поправок за вариации гравитационного поля требует более тщательного изучения алгоритмов вычисления объемов моделей гравитирующих тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазуров, Б.Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики. – Новосибирск: Сибпринт, 2019. – 360 с.
2. Шароглазова Г.А., Долгий П.С., Бахтин Д.В. Учет влияния вариаций гравитационного поля в геодезии современными средствами геопространственного анализа // Геодезия и картография. – 2022. – № 6. – С. 10–20. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-984-6-10-20.
3. Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976 / Под ред. С.А. Федотова. – М.: Наука, 1984. – 637 с.
4. Лаврухина Е.С., Малова И.Е. Основные способы и приемы доказательства формул площадей и объемов // Continuum. Математика. Информатика. Образование. – 2020. – № 2(18). – С. 16–23. DOI: 10.24888/2500-1957-2020-18-2-16-23.
5. Ильичев В.Ю., Селютин В.Ю. Автоматизация разбиения сложных трехмерных объектов на тетраэдральные конечные элементы // E-Scio. – 2021. – № 9(60). – С. 16–24.
6. Ефремова А.Н., Полячкова М.А., Васильева Л.В. Средства визуализации данных в скриптах на языке Python // Тр. Братского гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки. – 2019. – Т. 2. – С. 62–67.
7. Разин, С.А. Что должен знать разработчик на языке Python, работая в сфере data science // E-Scio. – 2020. – № 8(47). – С. 291–297.

REFERENCES

1. Mazurov, B.T. (2019). *Matematicheskoe modelirovanie pri issledovanii geodinamiki*. Novosibirsk: Sibprint. (In Russ.).
2. Sharoglazova, G.A., Dolgii, P.S. & Bakhtin, D.V. (2022). Uchet vliyaniya variatsii gravitatsionnogo polya v geodezii sovremennymi sredstvami geoprostranstvennogo analiza [Considering the gravitational field variations influence in geodesy by modern tools of geospatial analysis]. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]*, (6), 10–20. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-984-6-10-20. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Fedotov, S.A. (Eds.). (1984). *Bol'shoe treshchinnoe Tolbachinskoe izverzhenie. Kamchatka 1975–1976 [Large Tolbachik fissure eruption. Kamchatka 1975–1976]*. Moscow: Nauka. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Lavrukina, E.S. & Malova, I.E. (2020). Osnovnye sposoby i priemy dokazatel'stva formul ploshchadei i ob'emov [Basic methods for proof formulas of areas and volumes]. *Continuum. Matematika. Informatika. Obrazovaniye [Continuum. Mathematics. Computer science. Education]*, 2(18), 16–23. DOI: 10.24888/2500-1957-2020-18-2-16-23.
5. Il'ichev, V.Yu. & Selyutin, V.Yu. (2021). Avtomatizatsiya razbieniia slozhnykh trekhmernykh ob'ektov na tetraedral'nye konechnye elementy. *E-Scio*, 9(60), 16–24. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Efremova, A.N., Polyachkova, M.A. & Vasil'eva, L.V. (2019). Sredstva vizualizatsii dannykh v skriptakh na yazyke Python. *Tr. Bratskogo gos. un-ta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2, 62–67. (In Russ.).
7. Razin, S.A. (2020). Chto dolzhen znat' razrabotchik na yazyke Python, rabotaya v sfere data science. *E-Scio*, 8(47), 291–297. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 19.02.2024

COMPARISON OF THE RELIABILITY OF CALCULATING THE VOLUMES OF GRAVITATIONAL BODIES BY MEANS OF THE ARCGIS SOFTWARE PACKAGE AND THE SCIPY PYTHON LIBRARY

P. DOLHI, I. SHEVELEV
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article is the study continuation of the assessing of Earth's gravitational field variations (GFV) effect on the results of repeated leveling using modern means of geospatial analysis when observing deformations of natural and engineering objects. The main problems that arise when calculating volumes by means of ArcGIS are reflected. A new method for calculating the corrections for GFV using the python library scipy.spatial is proposed. The inexpediency of performing "enclosure" of Multipatch objects using the Enclose Multipatch tool is proved. The volumes calculated with and without "enclosure" are compared, as well as for "enclosed" objects – volumes calculated with the built-in tools of ArcGIS and using python libraries. The relationship of volume distortion in the calculation by different methods with the concomitant change in the surface area of the object, the number of vertices and the size along the Z axis is established. The comparison of the corrections for the GFV calculated using python libraries with the previously calculated built-in tools of ArcGIS has been performed. Testing of the technique was carried out on real data of cone models of the Great Fractured Tolbachinsky eruption on the Kamchatka Peninsula.

Keywords: *gravity field variations, repeated levelling, geospatial analysis, finite-elements model of partition, python-programming.*

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 628.544

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-87-93

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ДЕЗИНФИЦИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

М.А. КОМАРОВ¹⁾, А.В. ПОСПЕЛОВ²⁾, Н.Г. КОРОБ³⁾, А.Н. ХОТЬКО⁴⁾
⁽¹⁻³⁾ Белорусский государственный технологический университет, Минск,
⁴⁾ филиал БГТУ «Белорусский государственный колледж промышленности
и строительных материалов», Минск)

Сегодня в мире используется большое количество разнообразных дезинфицирующих веществ. По химической природе их можно разделить на органические и неорганические. Каждое из дезинфицирующих веществ имеет свои достоинства и недостатки. В данной статье нами проведен анализ воздействия на окружающую среду пяти различных дезинфицирующих веществ: гипохлорита натрия, гипохлорита кальция, хлорной извести, хлорамина и (как альтернативный вариант) раствора озона в воде. В качестве диапазона анализируемых этапов жизненного цикла выбраны: получение/синтез дезинфицирующего вещества, предварительная подготовка рабочего раствора, процедура дезинфекции. Каждый этап охарактеризован по ряду показателей: сырье и материалы, затраты энергии, вспомогательные вещества, выбросы, сбросы, образование отходов. Итоговое сравнение воздействия на окружающую среду выбранных дезинфицирующих веществ осуществлялось в программе SimaPro. Согласно результатам оценки наибольшее воздействие на окружающую среду оказывают хлорная известь и гипохлорит кальция. Наименьшее – использование водных растворов озона.

Ключевые слова: дезинфекция, оценка воздействие на окружающую среду, жизненный цикл, озон, гипохлорит кальция, гипохлорит натрия, хлорамин, хлорная известь.

Введение. Оценка воздействия на окружающую среду различных дезинфицирующих веществ является важным аспектом управления общественным здоровьем и экологической устойчивостью. В процессе использования дезинфицирующих веществ могут возникнуть различные вопросы, связанные с их потенциальным воздействием на окружающую среду. Применение экологических дезинфицирующих средств будет способствовать обеспечению более безопасной среды для человека. Многие традиционные дезинфицирующие вещества токсичны и вызывают аллергии. Разработка безопасных альтернатив способствует улучшению общественного здоровья. Потребители и организации все более ориентированы на использование продуктов и технологий, которые не вредят окружающей среде. Экологичные дезинфицирующие вещества соответствуют требованиям устойчивого развития и могут быть более привлекательными для общественности.

Исследования по поиску наиболее экологичного дезинфицирующего вещества для инактивации микроорганизмов представляют собой важное направление в научных исследованиях, и их актуальность обосновывается несколькими ключевыми факторами. Использование традиционных дезинфицирующих веществ, таких как хлорсодержащие соединения, может привести к негативным последствиям для экосистем. Данные растворы после использования для дезинфекции сооружений содержат высокую остаточную концентрацию активного вещества, что требует их обязательной обработки перед сбросом [1–4]. Также необходима стадия промывки после их использования. Поиск более экологичных альтернатив помогает уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Известно, что озон является одним из сильнейших окислителей, а после растворения в воде период его полураспада составляет 20–40 мин в зависимости от температуры воды [5–7]. Таким образом, растворы озона в воде являются перспективной альтернативой наиболее распространенным хлорсодержащим веществам. С технической точки зрения у озона как дезинфицирующего средства также ряд преимуществ [8–11]. Например, за счет более высокой эффективности инактивации микроорганизмов время воздействия на обрабатываемые поверхности и среды снижается в десятки раз в сравнении с использованием хлорсодержащих реагентов, что приводит к меньшей итоговой коррозии обрабатываемых сооружений. За счет быстрой и эффективной инактивации микроорганизмов оказывается меньшее разрушающее воздействие на материал обрабатываемых поверхностей [12–17]. Таким образом, внедрение экологичных дезинфицирующих веществ может быть выгодным и с экономической точки зрения. Новые технологии могут снижать затраты на подготовку реагентов, обработку и утилизацию отходов, а также влиять на снижение других вспомогательных расходов.

Из вышесказанного следует, что исследования в области поиска экологичных дезинфицирующих веществ с учетом их потенциального вклада в решение экологических, медицинских и социальных проблем крайне актуальны. Одним из известных способов оценки экологичности различных продуктов является методика оценки воздействия продукции на окружающую среду на этапах их жизненного цикла.

Цель исследования: сравнительный анализ воздействия хлорсодержащих дезинфицирующих веществ и активированного озона на окружающую среду на этапах их жизненного цикла при их использовании в системах водоснабжения.

Методология исследований. В данной работе в качестве возможных способов дезинфекции рассматриваются применение таких дезинфицирующих веществ, как гипохлорит кальция, гипохлорит натрия, хлорная известь и насыщенный раствор озона. Хлорамин Б не используется в качестве дезинфицирующего вещества в процессе водоподготовки, т.к. он содержит наименьшее содержание активного хлора (18–25 мас.%) в сравнении

с остальными хлорсодержащими дезинфицирующими веществами. Каждый из предложенных вариантов проанализирован от стадии получения реагентов до использования дезинфицирующих растворов. В качестве функциональной единицы выбран объем дезинфицирующего раствора в количестве 1 м³. Также принята 90%-ная эффективность переработки сырья на стадии производства/получения дезинфицирующего вещества. Исходные данные для оценки воздействия на окружающую среду были взяты из условий приготовления 1 м³ дезинфицирующего раствора с концентрацией 150 мг активного хлора /л или 1 мгО₃/л. Для сравнительного анализа использовалось программное обеспечение SimaPro8. Сравнение осуществляли с использованием метода IMPACT 2002 + V2.12.

Основная часть. Данный анализ будем проводить на примере технологий дезинфекции сооружений водоподготовки, т.к. в отличие от остальных вариантов дезинфекции этот характеризуется использованием полноценных технологических стадий.

Наибольший расход материалов и энергии отмечается в процессе производства гипохлорита кальция и хлорной извести. Методы получения гипохлорита кальция и хлорной извести схожи. Гипохлорит кальция формируется путем хлорирования известкового молока с применением гипохлорита натрия или без него. Обычно в процессе производства происходит образование кристаллогидрата гипохлорита. Хлорная известь, в свою очередь, – результат взаимодействия газообразного хлора с сухой гидроксидом кальция Са(ОН)₂. Хлор, полученный электролизом раствора NaCl, растворяют воздухом, и поступающий на процесс хлорирования газ обычно содержит 40–50% Cl₂. В газе не допускается превышение 1,5% Н₂ и 0,4% СО₂ (по хлору, в расчете на 90–98% содержание газа). Влажность не должна превышать 0,06%. Гашеную известь получают из порошкообразной извести с высоким содержанием кальция. Производство хлорной извести включает три этапа: обжиг известняка; гашение извести; хлорирование пушонки.

Известь образуется путем обжига известняка или мела при температуре 950–1100 °С. Исходный известняк, предназначенный для обжига, имеет размеры кусков от 70 до 120 мм и должен содержать не менее 91% СаСО₃, не более 1,7% MgСО₃ и не более 0,2% Al₂O₃. Присутствие 1% примесей в известняке приводит к почти 2% примесям в обожженной извести. В процессе обжига известняка карбоната кальция диссоциирует. Необходимое тепло для этого процесса вырабатывается при сжигании топлива. Диссоциация известняка происходит с достаточной полнотой уже при 900 °С, но для ускорения процесса температуру в наиболее горячей зоне печи поддерживают на уровне 1000–1100 °С.

При более низкой температуре часть известняка внутри крупных кусков не полностью разлагается, образуя так называемый недожог (или недопал), что негативно сказывается на качестве извести и увеличивает количество отходов при ее гашении. Более высокая температура приводит к плавлению кусков извести из-за присутствия примесей, таких как кремнезем, оксиды железа, алюминия, магния и др., образующие легкоплавкие силикаты в известняке и золе угля. Такая известь медленно гасится водой, и после гашения часть ее, вместе с недопалом, отсеивается в виде более крупных не полностью гашеных кусочков, известных как пережог (или перепал).

Для получения рабочего раствора гипохлорита кальция и хлорной извести используется гранулят, содержащий, в зависимости от продукта, от 65–75 мас.% и 30–35 мас.% свободного хлора соответственно. Для приготовления раствора используют емкости для растворения со скошенным дном, т.к. гипохлорит кальция содержит около 10 мас.% нерастворимых частиц, а в хлорной извести еще больше.

При производстве хлорамина Б (натриевой соли хлорамида бензолсульфокислоты, конкретно, ее тригидрата C₆H₅SO₂NCINa·3H₂O) также наблюдается существенное воздействие на окружающую среду. Промышленный метод получения хлорамина Б включает этапы воздействия газообразного хлора на водный раствор натриевой соли бензолсульфамида. Процесс состоит из трех этапов. На первом этапе бензол реагирует с хлорсульфоновой кислотой при соотношении моль бензола к хлорсульфоновой кислоте 1:2,5. Смесь перемешивается в течение часа при 30 °С. Далее сульфомассу подвергают обработке серной кислотой. Бензолсульфохлорид, образовавшийся в результате этого процесса, обрабатывают водным раствором аммиака при температуре 30 °С. Полученный бензолсульфамид выдерживают при 70 °С, затем производят отмывание водой и фильтрацию. На третьем этапе бензолсульфамид взаимодействует с газообразным хлором при 75–80 °С в щелочной среде (NaOH) с образованием хлорамина Б.

В меньшей степени потребление материалов и энергии характерно для производства гипохлорита натрия. В случае с гипохлоритом натрия его получение осуществляется на месте методом электролиза водного раствора хлорида натрия с добавками (СаCl₂ и др.). В электролизной ванне происходит диссоциация соли, а также воды. При включении электролизера в сеть на аноде будет происходить окисление хлоридов: 2Cl⁻ – 2e → Cl₂, затем их гидролиз: Cl₂ + H₂O → HCO + HCl. На катоде выделяется водород (H₂), образуется едкий натрий. В результате реакции NaOH с HClO образуется гипохлорит. Образующийся раствор полностью используется для процедуры дезинфекции.

Получение озона осуществляется непосредственно в месте его использования для дезинфекции. Это связано как с простотой его получения (из воздуха или кислорода), так и с небольшим временем его жизни (период полураспада в воде составляет 15–20 мин в зависимости от температуры). Данный аспект является положительным, т.к. озон относится к первому классу опасности и нахождение его это время в зоне дезинфекции позволит практически полностью использовать его окислительную способность и предотвратить выброс в окружающую среду.

Наиболее энергозатратными процессами являются производство гипохлорита кальция и хлорной извести на стадии обжига известняка при температурах около 1000 °С. Для достижения данных температур используют сжигание топлива, сопровождающееся значительными выбросами СО, СО₂, N_xO_y и SO₂ (при использовании в качестве топлива углей или мазута). При этом синтез хлорамина Б осуществляется при невысокой температуре 30 °С. Для получения гипохлорита натрия и озона необходима только электроэнергия, и происходит это непосредственно на месте их использования (сооружения водоподготовки).

Так же, как и затраты энергии, наибольшее воздействие на атмосферу в ходе основного процесса получения осуществляется при синтезе гипохлорита кальция и хлорной извести. Основная доля влияния приходится на продукты сгорания топлива в процессе обжига известняка. Как значительные характеризуются выбросы хлора.

В процессе генерации озона возможно слабое воздействие на атмосферу за счет выбросов остаточного озона и небольшого количества оксидов азота, образующихся в процессе разряда конденсаторов в генераторе озона.

При синтезе гипохлорита натрия непосредственно на установке происходит выделение водорода.

На стадии получения гипохлорита кальция, хлорной извести и хлорамина Б образуются маточные растворы и промывные воды, сбрасываемые периодически. Данные воды содержат компоненты сырьевых материалов, полу-продуктов и продуктов синтеза. На стадиях получения гипохлорита натрия и озона сточных вод не образуется.

При использовании всех хлорсодержащих веществ происходит образование сточных (отработанные растворы дезинфекции) и промывных вод. Они должны обезвреживаться, т.к. их объемы значительны, и при сбросе в сети канализации они могут привести к нарушению работы аэротенков на городских сооружениях очистки коммунальных сточных вод. К сожалению, на практике возможен их сброс на территорию, прилегающую к сооружениям, которые дезинфицировали. Для оценки воздействия на почвы нами ранее были проведены исследования, представленные в публикациях¹ [18]. Результаты проведенных экспериментов, оценивающих воздействие использованных дезинфицирующих растворов на почву в системах водоснабжения, показывают, что хлорная известь и гипохлорит натрия в этих растворах вызывают изменения в химическом составе почвы и снижают активность микроорганизмов в ней. В то время как остаточный озон активизирует процессы окисления органических веществ, причем эта активация сопровождается менее существенными изменениями в трансформации органических веществ в почве. Почва, подвергшаяся регулярному воздействию растворов с активным хлором, может потребовать ремедиации, предпочтительно с использованием активных почвенных бактерий в составе биопрепарата или специализированных штаммов, способных деградировать хлорорганические соединения. Применение озона для дезинфекции систем водоснабжения позволяет уменьшить экологическую нагрузку на почву в прилегающих зонах.

При производстве гипохлорита кальция, хлорной извести и хлорамина Б возникают отходы, содержащие компоненты исходных материалов, которые не участвовали в реакции. Также на этапе приготовления рабочих растворов, непосредственно перед их использованием, образуется осадок, представляющий собой нерастворимые соединения в составе гипохлорита кальция, хлорной извести и хлорамина Б. При производстве гипохлорита натрия и озона отходов не образуется. Анализ аспектов воздействия на окружающую среду при использовании хлорсодержащих дезинфицирующих веществ и озона представлены в таблице.

Таблица. – Анализ аспектов воздействия на окружающую среду при использовании хлорсодержащих дезинфицирующих веществ и озона

Аспект	Хлорсодержащие дезинфицирующие вещества				Озон
	Гипохлорит кальция	Хлорная известь	Хлорамин Б	Гипохлорит натрия	
Стадия производства/получения					
Реагенты	CaCO ₃ , Cl ₂ , вода	CaCO ₃ , Cl ₂ , вода, H ₂ SO ₄	Бензол, хлорсульфо- вая кислота, H ₂ SO ₄ , NH ₃	NaCl, вода, добавки CaCl ₂	–
Энергия	Энергия/топливо	Энергия/топливо	Энергия/топливо	Электроэнергия	–
Выбросы	CO ₂ , N _x O _y , Cl ₂	CO ₂ , N _x O _y , Cl ₂	CO ₂ , N _x O _y	–	–
Сбросы	Промывные воды, маточный раствор	Промывные воды, маточный раствор	Промывные воды, маточный раствор	–	–
Отходы	Недопал извести, перепал извести, шлам	Недопал извести, перепал извести, шлам	–	–	–
Стадия предварительной подготовки дезинфицирующего вещества					
Реагенты	Вода	Вода	Вода	–	–
Энергия	Электроэнергия	Электроэнергия	Электроэнергия	–	–
Отходы	Шлам	Шлам	Шлам	–	–
Стадия использования					
Реагенты	–	–	–	–	Воздух
Энергия	Электроэнергия	Электроэнергия	Электроэнергия	Электроэнергия	Электро- энергия
Выбросы	–	–	–	–	O ₃ , N _x O _y
Сбросы	Отработанный раствор и промывные воды содержащие Ca(ClO) ₂	Отработанный раствор и промывные воды содер- жащие Ca ²⁺ , Cl ⁻ , ClO ⁻	Отработанный раствор и промывные воды содержащие ClO ⁻	Отработанный раствор и промывные воды содержащие NaClO	–

¹ Романовский В.И., Бессонова Ю.Н. Сравнительный анализ способов дезинфекции водозаборных скважин и сооружений водоснабжения // Перспективы развития и организационно-экономические проблемы управления производством: материалы междуна. науч.-техн. конф. В 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск: Право и экономика, 2015. – Т 1. – С. 211–226.

Согласно процедуре оценки воздействия на основе анализа жизненного цикла, используя представленные входные и выходные потоки, необходимо выявить категории воздействия. Оценка важности потенциальных воздействий исследуемой системы на окружающую среду проводится на основе данных, полученных из качественного и количественного инвентаризационного анализа.

Изначально определяются категории воздействия, такие как канцерогенные эффекты, респираторные эффекты, истощение озонового слоя, воздействие на водные и земельные ресурсы и др. Этап взвешивания заключается в оценке значимости каждой категории воздействия для объединения значений в единую метрику, отражающую экологическую характеристику исследуемой системы. Результаты оценки жизненного цикла на данной стадии представлены на рисунках 1 и 2. Из графиков следует, что наиболее опасным для окружающей среды и человека является использование гипохлоритов кальция и натрия, содержащих хлор. Тем не менее, согласно методике расчета применение насыщенного раствора озона также является источником загрязнения водных объектов и почв тяжелыми металлами.

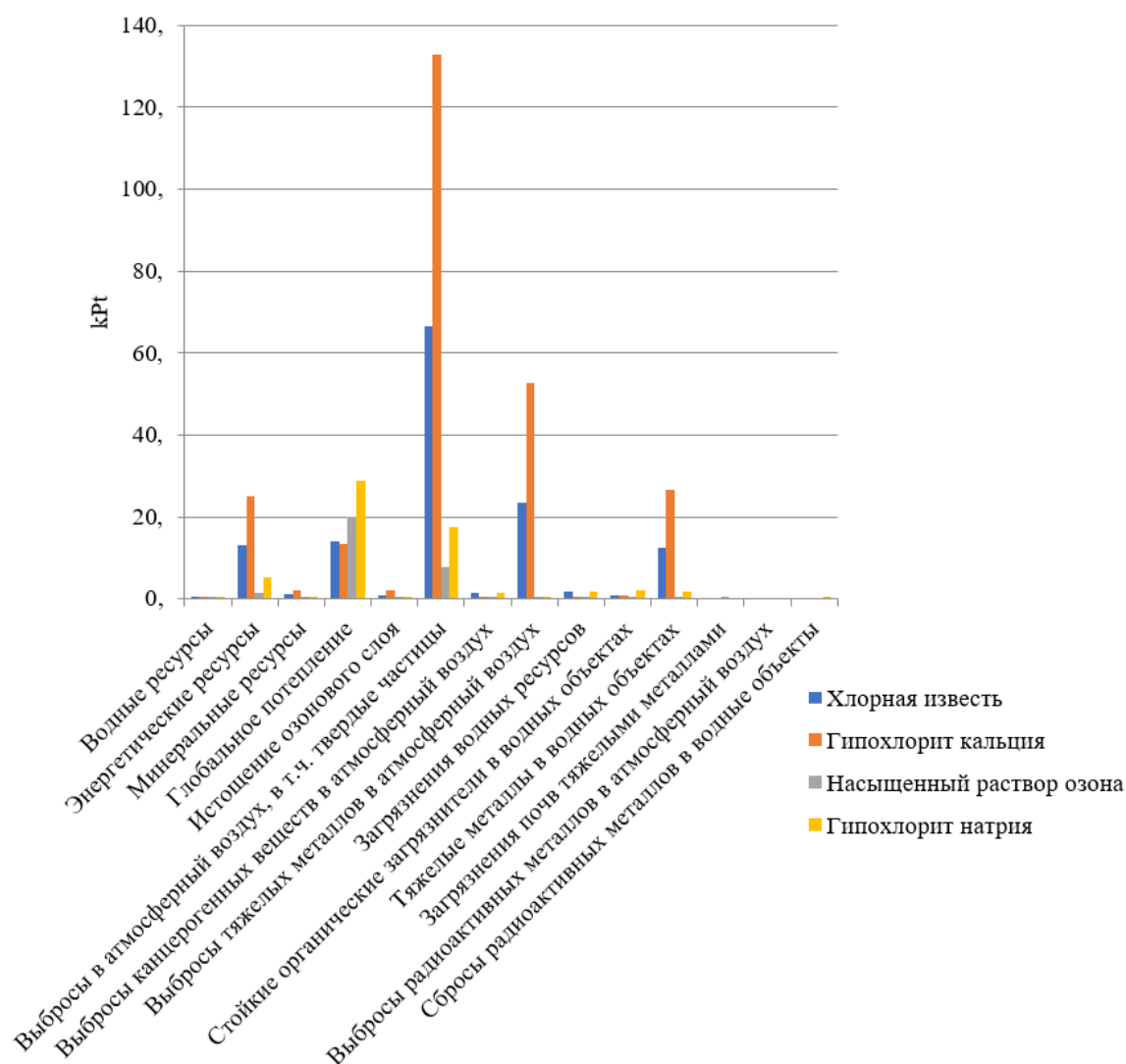


Рисунок 1. – Оценка жизненного цикла различных дезинфицирующих веществ по результатам взвешивания

Применение методики оценки жизненного цикла для сравнения эффективности различных веществ в процессе дезинфекции сооружений водоснабжения выявило, что наименьшее значение экоиндикатора наблюдается при использовании раствора озона в воде. Замечено также, что среди вариантов применения дезинфицирующих веществ наилучшие экологические характеристики проявляются у гипохлорита натрия.

Таким образом, оценка жизненного цикла позволяет количественно оценить экологические параметры различных дезинфицирующих веществ, учитывая этапы их производства, подготовки реагентов и непосредственного процесса дезинфекции. На основе такой оценки можно предварительно просчитать возможные последствия в различных категориях воздействия, таких как влияние на здоровье человека, состояние экосистем и истощение природных ресурсов. Это также обеспечивает выбор наилучшей технологии при сравнении различных альтернатив.

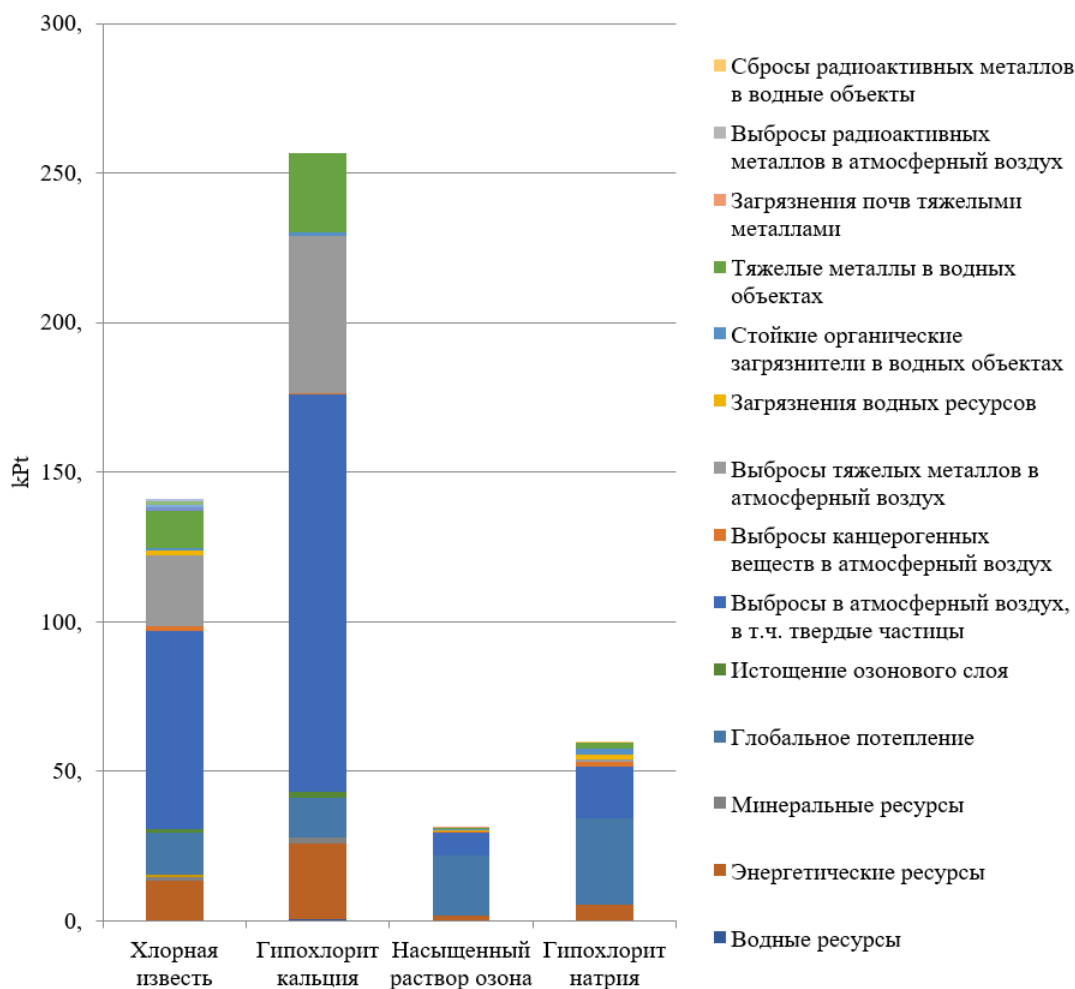


Рисунок 2. – Применение различных дезинфицирующих веществ по результатам взвешивания

С экологической точки зрения обработка озоном имеет преимущество перед обработкой гипохлоритом, т.к. не образуются отходы (или образуется ограниченное количество отходов). Хотя озон относится к тем же классам опасности, что и гипохлорит натрия, в отношении водных организмов, он имеет следующее преимущество – может образовываться непосредственно в водоеме в закрытой системе и его период полураспада составляет в среднем 20 мин. Это приводит к значительно меньшему воздействию на окружающую среду обработки озоном по сравнению с обработкой гипохлоритом натрия или кальция.

Самое высокое воздействие гипохлорита кальция на окружающую среду среди дезинфицирующих средств для поверхностей можно объяснить, главным образом, значительным воздействием на окружающую среду на этапе его производства. Также стоит отметить, что процесс приготовления дезинфицирующего раствора из свежей поверхности гипохлорита кальция начинается с исходного препарата концентрации 10 мас.%, который затем подлежит хранению в течение суток. После этого раствор проходит фильтрацию для удаления нерастворимых отложений и окончательно разбавляется до достижения требуемой концентрации. В противоположность этому, производство гипохлорита натрия включает только этап электролиза хлорида натрия непосредственно на месте. Для окончательного дезинфицирующего раствора гипохлорита натрия этот раствор побочных продуктов просто разбавляется без образования осадка. Генерация озона происходит и впрыскивается в воду непосредственно во время обработки.

Заключение. Таким образом, после разбора результатов исследований можно сделать выводы:

- среди проанализированных дезинфицирующих веществ интегральная оценка воздействия на окружающую среду уменьшается в ряду гипохлорит кальция > хлорная известь > гипохлорит натрия > раствор озона в воде;
- на стадии получения дезинфицирующих веществ наибольшее воздействие на окружающую среду оказывают производства гипохлорита кальция и хлорной извести;
- основным недостатком всех хлорсодержащих дезинфицирующих веществ является необходимость обеззараживания отработанных растворов и проведения нескольких промывок обрабатываемых поверхностей.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия», задание 2.1.02 «Сорбционные, каталитические и мембранные материалы для водоочистки и водоподготовки», НИР 5 «Физико-химические основы коррозии материалов в дезинфицирующих средах и разработка экологических и высокоэффективных способов дезинфекции» (2021–2023 гг.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дезинфекция озоном водозаборных скважин и трубопроводов систем питьевого водоснабжения / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, Ю.Н. Чайка и др. // Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в. – 2013. – № 3(159). – С. 55–60.
2. Ozone disinfection of water intake wells and pipelines of drinking water supply systems / V.I. Romanouski, A.D. Gurinovich, Yu.N. Chaika et al. // Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances. – 2013. – № 3(159). – P. 51–56.
3. Hurynovich A.D., Romanouski V.I., Wawrzyński P. Analiza efektywności kaskadowego generatora ozonu // *Economia i środowisko*. – 2013. – № 1(44). – S. 156–164.
4. Романовский В.И., Гуринович А.Д., Вавженюк П. Эффективность использования озона в технологии водоподготовки // *Водоочистка*. – 2014. – № 2. – С. 66–70.
5. Романовский В.И., Лихавицкий В.В., Гуринович А.Д. Исследование растворимости озона в воде по высоте столба жидкости // Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в. – 2015. – № 3(176). – С. 113–118.
6. Технические аспекты использования озона в водоподготовке / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, Ю.Н. Бессонова и др. // *Вода magazine*. – 2016. – № 2(102). – С. 36–41.
7. Анализ эффективности дезинфекции сооружений питьевого водоснабжения с использованием хлорсодержащих дезинфицирующих средств и озона / В.И. Романовский, М.В. Рымовская, Ю.Н. Бессонова и др. // *Вестн. БрГТУ. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология*. – 2015. – № 2(92). – С. 68–71.
8. Романовский В.И., Рымовская И.В., Янь Фэн С. Сравнительный анализ эффективности дезинфекции сооружений водоснабжения дезинфицирующими растворами // *Вода magazine*. – 2015. – № 10(98). – С. 18–21.
9. Определение основных параметров дезинфекции и обеззараживания озоном сооружений питьевого водоснабжения / В.И. Романовский, В.В. Лихавицкий, М.В. Рымовская и др. // Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в. – 2015. – № 3(176). – С. 108–112.
10. Гуринович А.Д., Романовский В.И., Бессонова Ю.Н. Эффективность дезинфекции озоном сооружений систем водоснабжения // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. – 2016. – № 10. – С. 48–51.
11. Исследование технических характеристик турбоозонатора с высокочастотным резонансным электроионизационным генератором озона / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, И.Д. Куницкая и др. // *Водоочистка*. – 2014. – № 3. – С. 66–69.
12. Романовский В.И., Жилинский В.В., Бессонова Ю.Н. Сравнительный анализ коррозионной устойчивости углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам электрохимическим методом // *Вестн. БрГТУ. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология*. – 2016. – № 2(98). – С. 126–129.
13. Романовский В.И., Чайка Ю.Н. Коррозионная устойчивость углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам // Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в. – 2014. – № 3(167). – С. 47–50.
14. Romanovski V.I., Chaika Yu.N. Carbon steels corrosion resistance to disinfectants // *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*. – 2014. – № 3(167). – P. 40–43.
15. Романовский В.И., Жилинский В.В. Коррозионная устойчивость стали 15 к дезинфицирующим растворам // Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в. – 2015. – № 3(176). – С. 29–34.
16. Коррозия нержавеющей стали в дезинфицирующих растворах / А.В. Поспелов, И.В. Мацукевич, А.А. Касач и др. // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки*. – 2023. – № 1(33). – С. 90–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-90-93.
17. Коррозия углеродистых сталей в дезинфицирующих растворах / А.В. Поспелов, И.В. Мацукевич, А.А. Касач и др. // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки*. – 2022. – № 14(32). – С. 89–93.
18. Рымовская М.В., Романовский В.И. Воздействие отработанных растворов дезинфекции сооружений водоснабжения на почву // Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в. – 2016. – № 4(186). – С. 214–219.

REFERENCES

1. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Chaika, Yu.N. & Vavzhenyuk, P. (2013). Dezinfektsiya ozonom vodozabornykh skvazhin i truboprovodov sistem pit'evogo vodosnabzheniya [Disinfection with ozone of water wells and pipelines of drinking water supply systems]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v* [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances], 3(159), 55–60. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Chaika, Yu.N. & Wawzhenyuk, P. (2013). Disinfection with ozone of water wells and pipelines of drinking water supply systems. *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*, 3(159), 55–60.
3. Hurynovich, A.D., Romanouski, V.I. & Wawrzyński, P. (2013). Analiza efektywności kaskadowego generatora ozonu. *Economia i środowisko*, 1(44), 156–164. (In Polish).
4. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D. & Vavzhenyuk, P. (2014). Effektivnost' ispol'zovaniya ozona v tekhnologii vodopodgotovki [Efficiency of ozone use in water treatment technology]. *Vodoochistka* [Water treatment], (2), 66–70. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Romanovskii, V.I., Likhavitskii, V.V. & Gurinovich, A.D. (2015). Issledovanie rastvorimosti ozona v vode po vysote stolba zhidkosti [Study of ozone solubility in water based on the height of the liquid column]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v* [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances], 3(176), 113–118. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Bessonova, Yu.N. & Kryshilovich, E.V. (2016). Tekhnicheskie aspekty ispol'zovaniya ozona v vodopodgotovke [Technical aspects of the use of ozone in water treatment]. *Voda magazine* [Water magazine], 2(102), 36–41. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Romanovskii, V.I., Rymovskaya, M.V., Bessonova, Yu.N., Kovalevskaya, A.M. & Likhavitskii, V.V. (2015). Analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii pit'evogo vodosnabzheniya s ispol'zovaniem khlorsoderzhashchikh dezinfitsiruyushchikh sredstv i ozona [Analysis of the effectiveness of disinfection of drinking water supply structures using chlorine-containing disinfectants and ozone]. *Vestn. BrGTU. Vodokhoz. str-vo, teploenergetika i geoekologiya* [Bulletin of BrSTU. Water management construction, heat power engineering and geoecology], 2(92), 68–71. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Romanovskii, V.I., Rymovskaya, I.V. & Yan' Fen, S. (2015). Sravnitel'nyi analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii vodosnabzheniya dezinfitsiruyushchimi rastvorami [Comparative analysis of the effectiveness of disinfection of water supply facilities with disinfectant solutions]. *Voda magazine* [Water magazine], 10(98), 18–21. (In Russ., abstr. in Engl.).

9. Romanovskii, V.I., Likhavitskii, V.V., Rymovskaya, I.V. & Gurinovich, A.D. (2015). Opredelenie osnovnykh parametrov dezinfektsii i obezrazhivaniya ozonom sooruzhenii pit'evogo vodosnabzheniya [Determination of the main parameters of disinfection and ozone disinfection of drinking water supply structures]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(176), 108–112. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Gurinovich, A.D., Romanovskii, V.I. & Bessonova, Yu.N. (2016). Effektivnost' dezinfektsii ozonom sooruzhenii sistem vodosnabzheniya [Efficiency of ozone disinfection of water supply system structures]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie [Vodoochistka. Water treatment. Water supply]*, (10), 48–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Kunitskaya, I.D. & Likhavitskii, V.V. (2014). Issledovanie tekhnicheskikh kharakteristik turboozonatora s vysokochastotnym rezonansnym elektro-ionizatsionnym generatorom ozona [Study of the technical characteristics of a turbo ozonizer with a high-frequency resonant electroionization ozone generator]. *Vodoochistka [Water treatment]*, (3), 66–69. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Romanovskii, V.I., Zhilinskii, V.V. & Bessonova, Yu.N. (2016). Sravnitel'nyi analiz korrozionnoi ustoichivosti uglerodistykh stalei k dezinfitsiruyushchim rastvoram elektrokhimicheskimi metodami [The comparative analysis of corrosion stability carbonaceous steels to the electrochemical disinfecting solutions by method]. *Vestn. BrGTU. Vodokhoz. str-vo, teploenergetika i geoekologiya [Bulletin of BrSTU. Water management construction, heat power engineering and geoecology]*, 2(98), 126–129. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Romanovskii, V.I. & Chaika, Yu.N. (2014). Korroziionnaya ustoichivost' uglerodistykh stalei k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of carbon steels to disinfectant solutions]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(167), 47–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Romanovskii, V.I. & Chaika, Yu.N. (2014). Carbon steels corrosion resistance to disinfectants. *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*, 3(167), 40–43.
15. Romanovskii, V.I. & Zhilinskii, V.V. (2015). Korroziionnaya ustoichivost' stali 15 k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of steel 15 to disinfectant solutions]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(176), 29–34. (In Russ., abstr. in Engl.).
16. Pospelov, A.V., Matsukevich, I.V., Kasach, A.A., Komarov, M.A. & Rozhko, S.N. (2023). Korroziya nerzhavayushchikh stalei v dezinfitsiruyushchikh rastvorakh [Corrosion of stainless steels in disinfectant solutions]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 1(33), 90–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-90-93. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Pospelov, A.V., Matsukevich, I.V., Kasach, A.A., Komarov, M.A. & Rozhko, S.N. (2022). Korroziya uglerodistykh stalei v dezinfitsiruyushchikh rastvorakh [Corrosion of carbon steels in disinfectant solutions]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 14(32), 89–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2022-32-14-89-93. (In Russ., abstr. in Engl.).
18. Rymovskaya, M.V. & Romanovskii, V.I. (2016). Vozdeistvie otrabotannykh rastvorov dezinfektsii sooruzhenii vodosnabzheniya na pochvu [Impact of spent disinfection solutions of water supply structures on soil]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 4(186), 214–219. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 20.12.2023

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF DISINFECTANTS

M. KOMAROV¹⁾, A. POSPELOV²⁾, N. KOROB³⁾, A. KHOTKO⁴⁾

⁽¹⁻³⁾ Belarusian State Technological University, Minsk,

⁴⁾ Belarusian State College of Construction Materials Industry,

Branch of the educational institution «Belarusian State Technological University», Minsk)

Today, a wide range of disinfectants are used in the world. According to their chemical nature, they are organic and inorganic. Each of the disinfectants has its own advantages and disadvantages. In this article, we analyzed the environmental impact of five different disinfectants: sodium hypochlorite, calcium hypochlorite, bleach, chloramine and, as an alternative, a solution of ozone in water. The range of life cycle stages to be analyzed included: production/synthesis of a disinfectant, preliminary preparation of a working solution, and disinfection procedure. Each stage is characterized by a number of indicators: raw materials, energy costs, auxiliary substances, emissions, discharges, waste generation. The final comparison of the environmental impact of the selected disinfectants was carried out in the SimaPro software. The assessment results show that bleach and calcium hypochlorite have the greatest impact on the environment. The use of aqueous solutions of ozone has the least impact on the components of the natural environment.

Keywords: disinfection, environmental impact assessment, life cycle, ozone, calcium hypochlorite, sodium hypochlorite, chloramine, bleaching powder.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЗИНФЕКЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ОЗОНА И ГИПОХЛОРИТА НАТРИЯ

А.В. ПОСПЕЛОВ¹⁾, М.А. КОМАРОВ²⁾, Н.Г. КОРОБ³⁾, А.Н. ХОТЬКО⁴⁾

^{1)–3)} Белорусский государственный технологический университет, Минск,

⁴⁾ филиал БГТУ «Белорусский государственный колледж промышленности
и строительных материалов», Минск)

Дезинфекция поверхностей различного функционального назначения – актуальная мера для инактивации микроорганизмов и вирусов. Данная процедура используется практически повсеместно – от сооружений водоподготовки до медицинских учреждений и общественных объектов. Наиболее распространенными дезинфицирующими средствами, рекомендуемыми ВОЗ, являются хлорсодержащие вещества. Однако известно, что озон – более сильный окислитель. В данной статье представлены результаты сравнительного анализа эффективности инактивации дрожжеподобных грибов *Candida albicans*, а также грамположительных *Bacillus subtilis* и грамотрицательных бактерий *Escherichia coli*. Для исследований использовали растворы озона в воде с концентрацией 0,5–1,5 мг/л и растворы гипохлорита натрия с концентрацией активного хлора 50–150 мг/л. В качестве субстратов – стальные и полимерные пластинки. Сравнение критерия СТ при соотношении NaClO к акватированному озону при ЛД50 показывает, что наименьшая разница (~ в 100 раз) составляет при инактивации *Candida albicans*, максимальная (до 230 раз) – при инактивации *Bacillus subtilis*.

Ключевые слова: дезинфекция, сталь, полимер, микроорганизмы, инаktivация.

Введение. Возникающая устойчивость микроорганизмов к существующим дезинфицирующим веществам создает необходимость поиска новых, более эффективных средств. Экологичные дезинфицирующие вещества могут представлять собой инновационные подходы к предотвращению распространения инфекций и снижению вероятности развития резистентности. Ранее было показано, что для разработки новых подходов к дезинфекции поверхностей перспективным направлением является использование водных растворов озона вместо широко распространенных хлорсодержащих реагентов [1–4]. Для обоснования данного направления необходимо подтвердить преимущества озона в сравнении с хлорсодержащими реагентами по ряду технических, экономических и экологических аспектов. Среди технических аспектов важными являются коррозионное воздействие на металлические поверхности и эффективность инактивации микроорганизмов на поверхностях. Коррозионное воздействие ранее было изучено нами для небольших концентраций активного хлора (50–150 мг/л), используемых в системах водоснабжения [5–9], и для концентраций активного хлора в растворах 2 мас.% [10; 11] для дезинфекции поверхностей различных видов стали, применяемых в пищевой промышленности, здравоохранении, местах общественного питания и др. Здесь используют растворы с высокими дозами активного хлора: 0,5–2 мас.% [12–14] и до 5 мас.%. Озон имеет много преимуществ по сравнению с хлорсодержащими растворами как с точки зрения эксплуатации технологии (синтез на месте использования [15–17], простота получения, разложение остаточного озона в течение часа¹ [18–20]), так и с точки зрения экологии – отсутствие необходимости промывки сооружений после дезинфекции и обработки отработанных растворов [21; 22].

В рамках данного этапа был проведен эксперимент по эффективности инактивации микроорганизмов различных штаммов.

Цель исследования: сравнительный анализ эффективности дезинфекции различных видов микроорганизмов на различных по природе поверхностях.

Методология исследований. В работе использованы культуры условно-патогенных и непатогенных бактерий и дрожжеподобных грибов из коллекции микроорганизмов кафедры биотехнологии БГТУ: дрожжеподобных грибов *Candida albicans*, а также грамположительных *Bacillus subtilis* и грамотрицательных бактерий *Escherichia coli*.

В исследовании в качестве дезинфицирующего средства использовалась вода с концентрацией озона 0,5; 1,0; 1,5 мг/л. Для получения водного озона использовали портативный генератор озона.

Растворы гипохлорита натрия готовились в концентрации 50, 100 и 150 мг/л по активному хлору из концентрированного раствора гипохлорита натрия (5 мас.%).

¹ Романовский В.И., Бессонова Ю.Н. Сравнительный анализ способов дезинфекции водозаборных скважин и сооружений водоснабжения // Перспективы развития и организационно-экономические проблемы управления производством: материалы междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск: Право и экономика, 2015. – Т 1. – С. 211–226.

В качестве материала для иммобилизации микроорганизмов использовались пластиковые и металлические пластины площадью 5 см².

Для определения концентрации озона в воде использовали методику определения остаточного озона в воде по ГОСТ 18301-72².

Эффективность инаktivации проводили по сравнению показателя ЛД50, при котором наблюдается инаktivация 50% исследуемых микроорганизмов, а также по критерию СТ.

Основная часть. Результаты по оценке эффективности водного озона против дрожжеподобных грибов *Candida albicans*, а также грамположительных *Bacillus subtilis* и грамотрицательных бактерий *Escherichia coli*, иммобилизованных на металлических и полимерных пластинах, представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1. – Эффективность инаktivации *Candida albicans* водным раствором озона, иммобилизованных на металлических пластинах

C(O ₃), мг/л	Время обработки, с							
	0	30	60	90	0	30	60	90
Металл					Полимер			
0,5	0,0	89,5	90,5	93,0	0	96,0	98,8	99,4
1	0,0	91,0	92,5	94,0	0	96,2	99,4	99,6
1,5	0,0	93,0	98,5	99,0	0	99,2	99,2	99,6
ClO ₂ ⁻ , мг/л	Время обработки, с							
	0	30	60	90	0	30	60	90
50	0,00	45,56	96,67	99,33	0,00	94,69	99,88	100,00
100	0,00	92,22	99,50	100,00	0,00	99,70	100,00	100,00
150	0,00	99,89	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00

Таблица 2. – Эффективность инаktivации *Bacillus subtilis* водным раствором озона, иммобилизованных на металлических пластинах

C(O ₃), мг/л	Время обработки, с							
	0	30	60	90	0	30	60	90
Металл					Полимер			
0,5	0	98,6	98,0	98,0	0	7,5	100,0	100,0
1	0	98,7	98,1	98,1	0	11,3	100,0	100,0
1,5	0	98,7	98,6	98,4	0	97,5	100,0	100,0
ClO ₂ ⁻ , мг/л	Время обработки, с							
	0	30	60	90	0	30	60	90
50	0	11,32	75,47	98,72	0,00	7,69	25,64	51,28
100	0	30,19	83,02	99,93	0,00	43,59	88,05	98,15
150	0	75,47	91,13	99,95	0,00	53,85	91,28	99,95

Таблица 3. – Эффективность инаktivации *Candida albicans* водным раствором озона, иммобилизованных на металлических пластинах

C(O ₃), мг/л	Время обработки, с							
	0	30	60	90	0	30	60	90
Металл					Полимер			
0,5	0	99,86	99,97	99,96	0	98,6	98,0	98,0
1	0	99,90	99,98	99,98	0	98,7	98,1	98,1
1,5	0	99,96	99,99	99,99	0	98,7	98,6	98,4
ClO ₂ ⁻ , мг/л	Время обработки, с							
	0	30	60	90	0	30	60	90
50	0	11,32	75,47	98,72	0,00	7,69	25,64	51,28
100	0	30,19	83,02	99,93	0,00	43,59	88,05	98,15
150	0	75,47	91,13	99,95	0,00	53,85	91,28	99,95

Из таблиц видно, что количество колониеобразующих единиц на опытных пластинах, в сравнении с контрольными образцами, снижается как для бактерий, так и для дрожжеподобных грибов вне зависимости от материала пластины. Эффективность инаktivации проводили по сравнению показателя ЛД50, при котором наблюдается инаktivация 50% исследуемых микроорганизмов. Этот показатель выбран по причине, что при использовании гипохлорита натрия не во всех случаях достигается эффективность более 90% в течение назначенного максимального времени воздействия. Значения критерия СТ при эффективности инаktivации 50%, полученные при различном времени обработки и различных дозах дезинфицирующих веществ представлены в таблице 4.

² ГОСТ 18301-72 Вода питьевая. Методы определения содержания остаточного озона. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 4 с.

Таблица 4. – Среднее значение критерия СТ при эффективности инактивации 50%, полученных при различном времени обработки и различных дозах дезинфицирующих веществ

Поверхность	AqO ₃	NaClO
<i>Candida albicans</i>		
Металл	0,24±0,12	28,39±4,67
Полимер	0,23±0,11	22,28±10,59
<i>Bacillus subtilis</i>		
Металл	0,22±0,11	51,47±15,43
Полимер	0,23±0,11	51,44±20,91
<i>Escherichia coli</i>		
Металл	0,22±0,11	22,92±9,73
Полимер	0,23±0,11	46,83±18,80

По результатам проведенного эксперимента водный раствор озона одинаково эффективен для инактивации дрожжеподобных грибов *Candida albicans*, грамположительных *Bacillus subtilis* и грамотрицательных бактерий *Escherichia coli* независимо от субстрата (металл или полимер). Также при использовании гипохлорита натрия не было существенной разницы в использовании различных субстратов при инактивации дрожжеподобных грибов *Candida albicans*, а также грамположительных бактерий *Bacillus subtilis*. Наиболее легко поддающимся инактивации проявили себя дрожжеподобные грибы, наиболее устойчивыми – грамположительные бактерии *Bacillus subtilis*. Существенную разницу показало влияние типа субстрата при инактивации *Escherichia coli*: на металлической пластине критерий СТ в 2,04 раза ниже, чем при инактивации на полимерной пластине.

Сравнение критерия СТ при соотношении NaClO к акватированному озону при ЛД50 показывает (рисунок), что наименьшая разница (~ в 100 раз) составляет при инактивации *Candida albicans*, максимальная (до 230 раз) – при инактивации *Bacillus subtilis*.

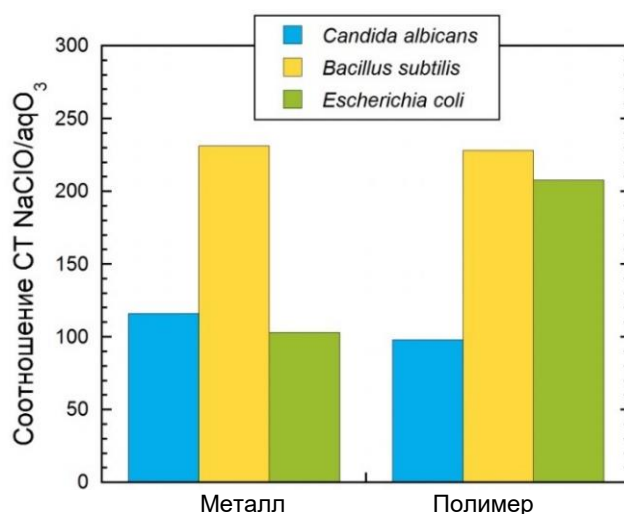


Рисунок. – Сравнение критерия СТ для акватированного озона и раствора гипохлорита натрия

Если сравнивать инактивацию различных видов микроорганизмов на поверхности в данном эксперименте с имеющимися литературными данными, можно отметить схожий порядок разности критерия СТ для гипохлорита натрия и акватированного озона. Однако в большинстве работ представлены результаты по инактивации микроорганизмов в объеме (обеззараживание), в то время как работ по исследованию инактивации микроорганизмов на поверхностях очень мало. Из опубликованных работ известно, что патогенные микроорганизмы инактивируются озоном в 15–20 раз, а споровые формы бактерий – в 300–600 раз быстрее, чем хлором [22]. Для обеззараживания 99% вирусов и микроорганизмов *Giardia* СТ показатель для озона равен 0,4 мг/(л·мин) и 0,48 мг/(л·мин) соответственно, в то время как для хлора (диоксида хлора) – 37 мг/(л·мин) (10 мг/(л·мин)) и 1 мг/(л·мин) (2,1 мг/(л·мин)) соответственно [22]. Для надежного уничтожения микроорганизмов и деактивации вирусов в воде должно присутствовать определенное минимальное количество остаточного озона, равное 0,4 мг/л, при минимальном времени воздействия 4 мин [22].

Заключение. Таким образом, по результатам, полученным после проведения исследований, можно сделать следующие выводы:

– акватированный озон как дезинфицирующее средство эффективнее раствора гипохлорита натрия в 100–230 раз в зависимости от вида микроорганизма;

- эффективность инактивации зависит от вида поверхности субстрата и вида микроорганизма;
- озон инактивирует микроорганизмы различной природы одинаково эффективно независимо от материала субстрата и вида микроорганизма;
- эффективность инактивации растворами гипохлорита натрия сильно зависит от материала субстрата и вида микроорганизма.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия», задание 2.1.02 «Сорбционные, каталитические и мембранные материалы для водоочистки и водоподготовки», НИР 5 «Физико-химические основы коррозии материалов в дезинфицирующих средах и разработка экологичных и высокоэффективных способов дезинфекции» (2021–2023 гг.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дезинфекция озоном водозаборных скважин и трубопроводов систем питьевого водоснабжения / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, Ю.Н. Чайка и др. // Тр. БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2013. – № 3(159). – С. 55–60.
2. Ozone disinfection of water intake wells and pipelines of drinking water supply systems / V.I. Romanowski, A.D. Gurinovich, Yu.N. Chaika et al. // Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances. – 2013. – № 3(159). – P. 51–56.
3. Hurynovich A.D., Romanowski V.I., Wawrzyniuk P. Analiza efektywności kaskadowego generatora ozonu // *Economia i środowisko*. – 2013. – № 1(44). – S. 156–164.
4. Исследование технических характеристик турбоозонатора с высокочастотным резонансным электроионизационным генератором озона / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, И.Д. Куницкая и др. // Водоочистка. – 2014. – № 3. – С. 66–69.
5. Романовский В.И., Жилинский В.В., Бессонова Ю.Н. Сравнительный анализ коррозионной устойчивости углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам электрохимическим методом // Вестн. БрГТУ. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2016. – № 2(98). – С. 126–129.
6. Романовский В.И., Чайка Ю.Н. Коррозионная устойчивость углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам // Тр. БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2014. – № 3(167). – С. 47–50.
7. Romanowski V.I., Chaika Yu.N. Carbon steels corrosion resistance to disinfectants // Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances. – 2014. – № 3(167). – P. 40–43.
8. Романовский В.И., Жилинский В.В. Коррозионная устойчивость стали 15 к дезинфицирующим растворам // Тр. БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2015. – № 3(176). – С. 29–34.
9. Коррозия нержавеющей стали в дезинфицирующих растворах / А.В. Поспелов, И.В. Мацукевич, А.А. Касач и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Приклад. науки. – 2023. – № 1(33). – С. 90–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-90-93.
10. Коррозия углеродистых сталей в дезинфицирующих растворах / А.В. Поспелов, И.В. Мацукевич, А.А. Касач и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Приклад. науки. – 2022. – № 14(32). – С. 89–93.
11. Efficacy of different concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine in disinfection of contaminated Resilon cones / V. Zand, A. Salem-Milani, S. Shahi et al. // *Medicina oral, patologia oral y cirugía bucal*. – 2012. – № 17(2). – P. e352. DOI: 10.4317/medoral.17467.
12. The Disinfection Characteristics of Ebola Virus Outbreak Variants / B.W.M. Cook, T.A. Cutts, A.M. Nikiforuk et al. // *Sci. Rep.* – 2016. – № 6. – P. 38293. DOI: 10.1038/srep38293.
13. Gallandat K., Wolfe M.K., Lantagne D. Surface cleaning and disinfection: Efficacy assessment of four chlorine types using *Escherichia coli* and the Ebola surrogate Phi6 // *Environmental science & technology*. – 2017. – № 51(8). – P. 4624–4631. DOI: 10.1021/acs.est.6b06014.
14. Романовский В.И., Гуринович А.Д., Вавженюк П. Эффективность использования озона в технологии водоподготовки // Водоочистка. – 2014. – № 2. – С. 66–70.
15. Романовский В.И., Лихавицкий В.В., Гуринович А.Д. Исследование растворимости озона в воде по высоте столба жидкости // Тр. БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2015. – № 3(176). – С. 113–118.
16. Технические аспекты использования озона в водоподготовке / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, Ю.Н. Бессонова и др. // Вода magazine. – 2016. – № 2(102). – С. 36–41.
17. Анализ эффективности дезинфекции сооружений питьевого водоснабжения с использованием хлорсодержащих дезинфицирующих средств и озона / В.И. Романовский, М.В. Рымовская, Ю.Н. Бессонова и др. // Вестн. БрГТУ. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2015. – № 2(92). – С. 68–71.
18. Романовский В.И., Рымовская И.В., Янь Фэн С. Сравнительный анализ эффективности дезинфекции сооружений водоснабжения дезинфицирующими растворами // Вода magazine. – 2015. – № 10(98). – С. 18–21.
19. Определение основных параметров дезинфекции и обеззараживания озоном сооружений питьевого водоснабжения / В.И. Романовский, В.В. Лихавицкий, М.В. Рымовская и др. // Тр. БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2015. – № 3(176). – С. 108–112.
20. Гуринович А.Д., Романовский В.И., Бессонова Ю.Н. Эффективность дезинфекции озоном сооружений систем водоснабжения // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2016. – № 10. – С. 48–51.
21. Рымовская М.В., Романовский В.И. Воздействие отработанных растворов дезинфекции сооружений водоснабжения на почву // Тр. БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2016. – № 4(186). – С. 214–219.
22. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Самойлович В.Г. Озонирование в процессах очистки воды / под ред. В.Л. Драгинского. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 400 с.

REFERENCES

1. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Chaika, Yu.N. & Vavzhenyuk, P. (2013). Dezinfektsiya ozonom vodozabornykh skvazhin i truboprovodov sistem pit'evogo vodosnabzheniya [Disinfection with ozone of water wells and pipelines of drinking water supply systems]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v* [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances], 3(159), 55–60. (In Russ., abstr. in Engl.).

2. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Chaika, Yu.N. & Wawzhenyuk, P. (2013). Disinfection with ozone of water wells and pipelines of drinking water supply systems. *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*, 3(159), 55–60.
3. Hurynovich, A.D., Romanowski, V.I. & Wawrzyniuk, P. (2013). Analiza efektywności kaskadowego generatoru ozonu. *Economia i środowisko*, 1(44), 156–164. (In Polish).
4. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Kunitskaya, I.D. & Likhavitskii, V.V. (2014). Issledovanie tekhnicheskikh kharakteristik turboozonatora s vysokochastotnym rezonansnym elektroionizatsionnym generatorom ozona [Study of the technical characteristics of a turbo ozonizer with a high-frequency resonant electroionization ozone generator]. *Vodoochistka [Water treatment]*, (3), 66–69. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Romanovskii, V.I., Zhilinskii, V.V. & Bessonova, Yu.N. (2016). Sravnitel'nyi analiz korrozionnoi ustoichivosti uglevodistykh staley k dezinfitsiruyushchim rastvoram elektrokhimicheskim metodom [The comparative analysis of corrosion stability carbonaceous stalya to the elektrokhimicheskim disinfecting solutions by method]. *Vestn. BrGTU. Vodokhoz. str-vo, teploenergetika i geoekologiya [Bulletin of BrSTU. Water management construction, heat power engineering and geoecology]*, 2(98), 126–129. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Romanovskii, V.I. & Chaika, Yu.N. (2014). Korrozionnaya ustoichivost' uglevodistykh staley k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of carbon steels to disinfectant solutions]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(167), 47–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Romanovskii, V.I. & Chaika, Yu.N. (2014). Carbon steels corrosion resistance to disinfectants. *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*, 3(167), 40–43.
8. Romanovskii, V.I. & Zhilinskii, V.V. (2015). Korrozionnaya ustoichivost' stali 15 k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of steel 15 to disinfectant solutions]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(176), 29–34. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Pospelov, A.V., Matsukevich, I.V., Kasach, A.A., Komarov, M.A. & Rozhko, S.N. (2023). Korroziya nerzhavayushchikh staley v dezinfitsiruyushchikh rastvorakh [Corrosion of stainless steels in disinfectant solutions]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 1(33), 90–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-90-93. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Pospelov, A.V., Matsukevich, I.V., Kasach, A.A., Komarov, M.A. & Rozhko, S.N. (2022). Korroziya uglevodistykh staley v dezinfitsiruyushchikh rastvorakh [Corrosion of carbon steels in disinfectant solutions]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 14(32), 89–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2022-32-14-89-93. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Zand, V., Salem-Milani, A., Shahi, S., Akhi, M.T. & Vazifekha, S. (2012). Efficacy of different concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine in disinfection of contaminated Resilon cones. *Medicina oral, patologia oral y cirugia bucal*, 17(2), e352. DOI: 10.4317/medoral.17467. (In Engl.).
12. Cook, B.W.M., Cutts, T.A., Nikiforuk, A.M., Leung, A., Kobasa, D. & Theriault, S.S. (2016). The Disinfection Characteristics of Ebola Virus Outbreak Variants. *Sci. Rep.*, 6, 38293. DOI: 10.1038/srep38293.
13. Gallandat, K., Wolfe, M.K. & Lantagne, D. (2017). Surface cleaning and disinfection: Efficacy assessment of four chlorine types using *Escherichia coli* and the Ebola surrogate Phi6. *Environmental science & technology*, 51(8), 4624–4631. DOI: 10.1021/acs.est.6b06014.
14. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D. & Vavzhenyuk, P. (2014). Effektivnost' ispol'zovaniya ozona v tekhnologii vodopodgotovki [Efficiency of ozone use in water treatment technology]. *Vodoochistka [Water treatment]*, (2), 66–70. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Romanovskii, V.I., Likhavitskii, V.V. & Gurinovich, A.D. (2015). Issledovanie rastvorimosti ozona v vode po vysote stolba zhidkosti [Study of ozone solubility in water based on the height of the liquid column]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(176), 113–118. (In Russ., abstr. in Engl.).
16. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Bessonova, Yu.N. & Kryshilovich, E.V. (2016). Tekhnicheskie aspekty ispol'zovaniya ozona v vodopodgotovke [Technical aspects of the use of ozone in water treatment]. *Voda magazine [Water magazine]*, 2(102), 36–41. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Romanovskii, V.I., Rymovskaya, M.V., Bessonova, Yu.N., Kovalevskaya, A.M. & Likhavitskii, V.V. (2015). Analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii pit'evogo vodosnabzheniya s ispol'zovaniem khlorso-derzhashchikh dezinfitsiruyushchikh sredstv i ozona [Analysis of the effectiveness of disinfection of drinking water supply structures using chlorine-containing disinfectants and ozone]. *Vestn. BrGTU. Vodokhoz. str-vo, teploenergetika i geoekologiya [Bulletin of BrSTU. Water management construction, heat power engineering and geoecology]*, 2(92), 68–71. (In Russ., abstr. in Engl.).
18. Romanovskii, V.I., Rymovskaya, I.V. & Yan' Fen, S. (2015). Sravnitel'nyi analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii vodosnabzheniya dezinfitsiruyushchimi rastvorami [Comparative analysis of the effectiveness of disinfection of water supply facilities with disinfectant solutions]. *Voda magazine [Water magazine]*, 10(98), 18–21. (In Russ., abstr. in Engl.).
19. Romanovskii, V.I., Likhavitskii, V.V., Rymovskaya, I.V. & Gurinovich, A.D. (2015). Opredelenie osnovnykh parametrov dezinfektsii i obezrazhivaniya ozonom sooruzhenii pit'evogo vodosnabzheniya [Determination of the main parameters of disinfection and ozone disinfection of drinking water supply structures]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(176), 108–112. (In Russ., abstr. in Engl.).
20. Gurinovich, A.D., Romanovskii, V.I. & Bessonova, Yu.N. (2016). Effektivnost' dezinfektsii ozonom sooruzhenii sistem vodosnabzheniya [Efficiency of ozone disinfection of water supply system structures]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie [Vodoochistka. Water treatment. Water supply]*, (10), 48–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
21. Rymovskaya, M.V. & Romanovskii, V.I. (2016). Vozdeistvie otrabotannykh rastvorov dezinfektsii sooruzhenii vodosnabzheniya na pochvu [Impact of spent disinfection solutions of water supply structures on soil]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 4(186), 214–219. (In Russ., abstr. in Engl.).
22. Draginskii, V.L., Alekseeva, L.P. & Samoilovich, V.G. (2007). *Ozonirovanie v protsessakh ochistki vody*. Moscow: DeLi print. (In Russ.).

Поступила 20.12.2023

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SURFACE DISINFECTION
IN AQUEOUS SOLUTIONS OF OZONE AND SODIUM HYPOCHLORITE****A. POSPELOV¹⁾, M. KOMAROV²⁾, N. KOROB³⁾, A. KHOTKO⁴⁾****(¹⁾⁻³⁾ Belarusian State Technological University, Minsk,****⁴⁾ Belarusian State College of Construction Materials Industry,
Branch of the educational institution «Belarusian State Technological University», Minsk)**

Disinfection of surfaces for various functional purposes is an important measure for the inactivation of microorganisms and viruses. This procedure is used almost everywhere, from water treatment facilities to medical institutions and public facilities. Among the most common disinfectants recommended by WHO are chlorine-containing substances. However, ozone is known to be a stronger oxidizing agent. This paper presents the results of a comparative analysis of the effectiveness of inactivation of yeast-like fungi *Candida albicans*, as well as gram-positive *Bacillus subtilis* and gram-negative bacteria *Escherichia coli*. For research, ozone solutions in water with a concentration of 0,5–1,5 mg/l and sodium hypochlorite solutions with an active chlorine concentration of 50–150 mg/l were used. Steel and polymer plates were used as substrates. Comparison of the CT criterion for the ratio of NaClO to aquated ozone at LD50 shows that the smallest difference is about 100 times when *Candida albicans* is inactivated, and the maximum difference is up to 230 times when *Bacillus subtilis* is inactivated.

Keywords: disinfection, steel, polymer, microorganism, inactivation.

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д., Макаров Е.К., Деменчук А.К.</i> Математическая модель удаления железа в процессе внутрипластовой обработки подземных вод.....	2
<i>Wang X., Yu H., Sadovskaya E., Kovshar S., Leonovich S.</i> Comparative study on the applicability of non-metallic nanofibers and reed fibers in concrete.....	14
<i>Лазовский Д.Н., Бадалова Е.Н.</i> Моделирование напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных железобетонных элементов, усиленных композитным материалом	21
<i>Морозова Е.Б.</i> Экологические аспекты промышленной архитектуры.....	28
<i>Borovkova E., Shabanov D.</i> Monitoring of fibroblast at an early age by the method of acoustic emission	34
<i>Козунова О.В., Пусенков А.Г.</i> Статические расчеты балочной плиты на однородном упругом основании с учетом касательных напряжений	39
<i>Kravchenko V.</i> A modelling framework of portland cement hydration	45
<i>Оденбах И.А.</i> Численное моделирование естественного освещения, инсоляции и солнцезащиты	53
<i>Соловьёв А.А.</i> Итоги натурных исследований стен дома по ул. Нижне-Покровская, 20 (келейный корпус бывшего францисканского монастыря) в г. Полоцке	59
<i>Толмач М.П., Ращинский Н.В., Парфенова Л.М.</i> Композиционное гипсовое вяжущее с использованием доломитовой муки и золошлаковых отходов.....	67

ГЕОДЕЗИЯ

<i>Долгий П.С., Шевелев И.П.</i> Сравнение достоверности вычисления объемов гравитирующих тел средствами программного комплекса ArcGIS и python-библиотеки scipy	79
--	----

ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Комаров М.А., Поспелов А.В., Короб Н.Г., Хотько А.Н.</i> Оценка воздействия на окружающую среду дезинфицирующих веществ.....	87
<i>Поспелов А.В., Комаров М.А., Короб Н.Г., Хотько А.Н.</i> Сравнительный анализ эффективности дезинфекции поверхностей в водных растворах озона и гипохлорита натрия	94