

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Tom I.
Rok 1818.

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

№ 14(32), 2022

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 рэцэнзаваўне і змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне геадэзіі, геаэкалогіі, экалагічнай бяспекі будаўніцтва і гарадской гаспадаркі, будаўніцтва і архітэктуры.

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

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

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

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

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

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

Подписано к печати 29.12.2022. Бумага офсетная 70 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.
Усл. печ. л. 13,98. Уч.-изд. л. 15,97. Тираж 50 экз. Заказ 767.

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 666.973.2

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-2-9

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ СМЕСИ РИСОВОЙ ЛУЗГИ И СОЛОМЫ

канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ, И ЧЖАН
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)
д-р философии, проф. Ф. ГАСПАР
(Политехнический институт г. Лейрии, Португалия)

Настоящее исследование направлено на получение экологически чистых теплоизоляционных плит, содержащих в качестве основного структурообразующего материала рисовую лузгу. Вторым компонентом структурообразующего состава является пшеничная солома. Приведены экспериментальные данные о физических свойствах теплоизоляционных плит, включая плотность, теплопроводность, сорбционную влажность и прочность на сжатие. Использование соломы в количестве до 50% от общей массы состава позволяет снизить коэффициент теплопроводности изоляционных плит до 0,054–0,055 Вт/(м·К). Показатели коэффициента теплопроводности изоляционных плит обусловлены микроструктурой шелухи и пшеничной соломы, что подтверждается результатами электронной микроскопии, полученными в ходе исследований. Жидкое стекло обеспечивает формирование жесткой и долговечной структуры экологически безопасных теплоизоляционных плит и предотвращает повреждение изоляции грызунами.

Ключевые слова: рисовая лузга, измельченная солома, теплоизоляционные плиты, микроструктура, теплопроводность, сорбционная влажность.

Введение. После получения рисового зерна в качестве отхода образуется рисовая солома и лузга. В отличие от соломы рисовая лузга очень стойка к процессам гниения и не распадается в земле ввиду наличия в ней диоксида кремния¹, поэтому использование ее в качестве удобрения не особо эффективно.

Традиционным способом утилизации лузги является использование в качестве источника тепловой энергии, т.е. сжигание. Рисовая лузга признана одним из основных потенциальных возобновляемых источников энергии [1]. В свою очередь зола лузги содержит большое количество макро- и микроэлементов, что делает ее особо ценным минеральным удобрением [2]. Применение рисовой золы обеспечивает снижение расхода цемента, необходимого для производства бетона [3].

Перспективным направлением в строительстве считается использование рисовой лузги в составах стеновых и теплоизоляционных материалов. В исследованиях² предлагается часть древесных отходов в арболите заменять рисовой лузгой для снижения коэффициента теплопроводности стеновых блоков до 0,079–0,087 Вт/(м·К). В Кубанском технологическом университете получены образцы арболита на основе цемента, рисовой лузги и комплекса добавок для 3D печати зданий [4].

Имеются сведения [5] о возможности применения гранулированной рисовой лузги в качестве структурного материала для тепловой изоляции. Международной группой ученых созданы биоизоляционные плиты на рисовой лузге [6] с коэффициентом теплопроводности в пределах 0,046–0,057 Вт/(м·К) при минимальной плотности 154 кг/м³.

В Таиланде разработали теплоизоляционные плиты из рисовой лузги с использованием формальдегидной и фенолформальдегидной смолы³. При плотности плит 139–168 кг/м³ коэффициент теплопроводности равен 0,046–0,056 Вт/(м·К). Однако присутствие смол не позволяет обеспечить экологическую безопасность теплоизоляционных плит.

Использование рисовой лузги в качестве структурообразующего компонента теплоизоляционных композитов является перспективным направлением. Поэтому основной целью исследований является получение на основе лузги экологически безопасных теплоизоляционных материалов, обеспечивающих комплекс эксплуатационных показателей, включая низкую теплопроводность.

Материалы и методы. Во многих странах мира рис выращивают как злаковую культуру. Зерно риса защищено оболочкой, которую ученые называют цветковой чешуей, а производители – лузгой или шелухой [7]. По информации The Food and Agriculture Organization, ежегодно в мире производится около 740 миллионов тонн риса. Выход лузги составляет около 20% от массы необработанного риса⁴. Таким образом, ежегодно в мире

¹ Калита, Е. Рисовая шелуха: методы и технологии утилизации. URL: <https://greenologia.ru/othody/utilizaciya-i-pererabotka/risovaya-sheluxa.html>.

² Щибря, А.Ю. Эффективный теплоизоляционный материал из поризованного арболита на рисовой лузге : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / А.Ю. Щибря ; Кубанский гос. технол. ун-т. – Ростов-на-Дону, 2000. – 21 с.

³ Panyakaew, S. Agricultural waste materials as thermal insulation for dwellings in Thailand: preliminary results / S. Panyakaew, S. Fotios // PLEA : 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22–24 Oct. 2008. – Dublin, 2008. URL: http://web5.arch.cuhk.edu.hk/server1/staff1/edward/www/plea2018/plea/2008/content/papers/oral/PLEA_FinalPaper_ref_321.pdf.

⁴ Данг, Ш.Л. Высокоэффективный пенобетон с применением золы рисовой шелухи : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Ш.Л. Данг ; Московский гос. строит. ун-т. – М., 2006. – 26 с.

образуется около 148 миллионов тонн рисовой лузги. Насыпная плотность рисовой лузги составляет 100–105 кг/м³. В экспериментальных составах рисовая лузга использовалась в качестве структурообразующего материала без предварительной подготовки.

В качестве второго компонента структурообразующей композиции использовали измельченную или резанную пшеничную солому. Измельченную солому получали в виде плоских частиц, вытянутых в длину. Толщина соломенных частиц соответствует толщине стенки стебля и равна 250–400 мкм, ширина – 1–3 мм, длина – 5–12 мм. Резанная солома представляет собой фрагменты нарезанного стебля в виде трубок длиной 20–40 мм. В насыпном состоянии плотность измельченной соломы находится в пределах 60–63 кг/м³, а резанной соломы равна 39–42 кг/м³.

Для получения измельченной соломы использовали измельчитель типа «Эликор-1». Нарезка пшеничной соломы осуществлялась на барабанной соломорезке типа РСБ-0.1.

При формовке экспериментальных теплоизоляционных плит в качестве вяжущего использовали натриевое жидкое стекло, произведенное на ОАО «Домановский производственно-торговый комбинат» и отвечающее требованиям ГОСТ 13078. Плотность жидкого стекла составляет 1450–1470 кг/м³.

С целью повышения водостойкости жидкого стекла использовали минеральные добавки в виде извести и гипса. Использовали строительную гидратную известь II сорта без добавок производства ОАО «Забудова» и гипс, изготовленный на ОАО «Белгипс».

По методикам ГОСТ 17177 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний» определяли плотность и влажность теплоизоляционных плит.

Коэффициент теплопроводности экспериментальных образцов измеряли на приборе ИТП-МГ4 на образцах-плитах размером 250×250×30 мм согласно СТБ 1618 «Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме».

Для получения образцов-плит рисовую лузгу или композиции на основе лузги и соломы перемешивали с модифицированным жидким стеклом. Известь засыпали в жидкое стекло и тщательно перемешивали до однородной вязкой массы белого цвета, а затем вводили порошок гипса. Подготовленную композицию равномерно распределяли по форме и с помощью пресса формовали при давлении 4 МПа. Образцы выдерживали в форме 8 часов при температуре 20±2 °С, а затем высушивали в течение 10 часов в сушильном шкафу SNOL60/300 LFN при температуре 45–50 °С. Для полученных образцов-плит размером 250×250×30 мм определяли среднюю плотность и теплопроводность.

Сорбционную влажность утеплителей исследовали по ГОСТ 24816-2014 «Материалы строительные. Метод определения равновесной сорбционной влажности» с использованием стеклянных эксикаторов. Массы образцов и сырьевых материалов определяли на настольных электронных весах ВНЭ-35.

Электронный микроскоп марки «JSM-5610 LV» использовали для исследования микроструктуры рисовой лузги и пшеничной соломы.

Экспериментальные исследования. При изучении микроструктуры установлено, что толщина скорлупы лузги составляет около 50 мкм. При этом скорлупа состоит из двух слоев, внутреннего и внешнего, значительно отличающихся визуально и по своей структуре (рисунки 1, 2). Внешний слой скорлупы имеет ярко выраженную рельефную мелкобугристую фактуру (см. рисунок 1). При детальном рассмотрении установлено, что верхний слой бугристой фактуры условно разделен на микрообласти – бугорки прямоугольного очертания с примерными размерами 100×80 мкм. На каждом бугорке присутствует микрошип высотой 25–35 мкм. Несмотря на то, что внешний слой имеет толщину 20 мкм без учета высоты микрошипов, при этом он обеспечивает прочность и твердость скорлупы лузги за счет плотной структуры.

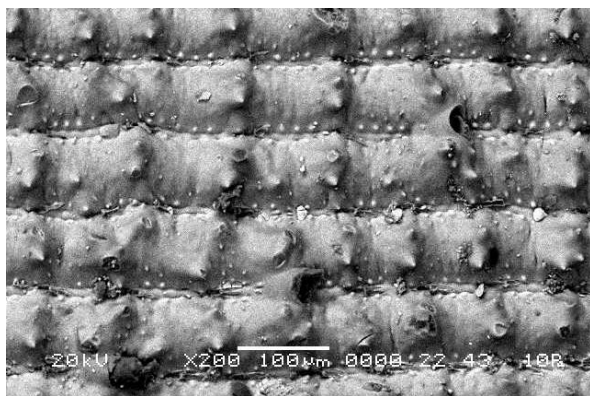


Рисунок 1. – Внешняя поверхность скорлупы рисовой лузги (200 крат)

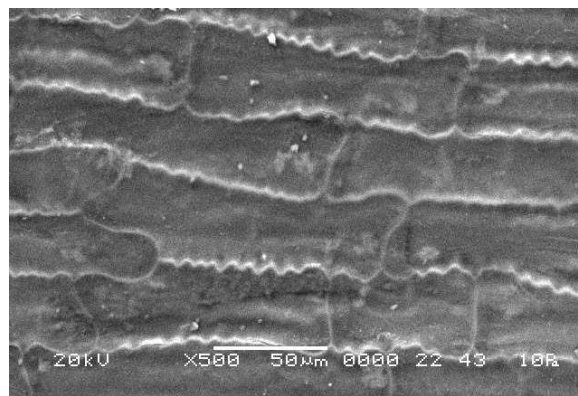


Рисунок 2. – Внутренняя поверхность скорлупы рисовой лузги (500 крат)

Внутренняя область скорлупы представляет собой ячеистую структуру в виде замкнутых плоских микрообластей длиной 70–100 мкм, шириной 40–50 мкм. Стенки ячеек внутренней структуры тонкие и прозрачные толщиной 1–2 мкм (см. рисунок 2).

При формировании структуры теплоизоляционного материала, из-за выпуклой формы скорлупы, области контакта между скорлупами лузги в основном будут проходить по поверхности внешних слоев. Можно предположить, что благодаря выраженному рельефу внешней поверхности скорлупы будет обеспечена высокая адгезия вяжущего с лузгой при формировании структуры тепловой изоляции.

Проведенная электронная микроскопия структуры стебля пшеничной соломы выявила определенные особенности строения. При изучении торцевого среза стебля установлено, что в структуре присутствуют две четко различимые области. Внутренняя область представлена ячеистой структурой, сформированной из продольных трубок с поперечными перегородками. В поперечном сечении ячейки имеют округлую форму диаметром 20–60 мкм и визуально напоминают пчелиные соты. Поперечные перегородки располагаются с шагом 70–90 мкм. Стенки между ячейками прозрачные толщиной не более 1 мкм и формируются из двух оболочек соседних ячеек. Внешняя область также сформирована из продольно располагаемых капилляров с поперечными перегородками. Однако диаметр ячеек существенно меньше и составляет 7–20 мкм при толщине стенок 3–4 мкм.

После изучения внешней поверхности стебля пшеничной соломы установлено, что с внешней стороны пшеничная солома защищена тонкой плотной оболочкой с мелким бороздчатым рельефом. Также по данным⁵, поверхность соломы покрыта тончайшим слоем воска, что может снижать адгезию соломы с отдельными видами вяжущих материалов.

Изучение микроструктуры плит из смеси лузги и соломы выявило, что в процессе формовки трубки из стебля пшеницы подвергаются деформациям. В зависимости от расположения в структурной системе круглые в поперечном сечении трубки могут деформироваться, частично изменяя форму на близкую к овальному очертанию в поперечном сечении (рисунок 3) или полностью сплюсываются до формы пластинок (рисунок 4).

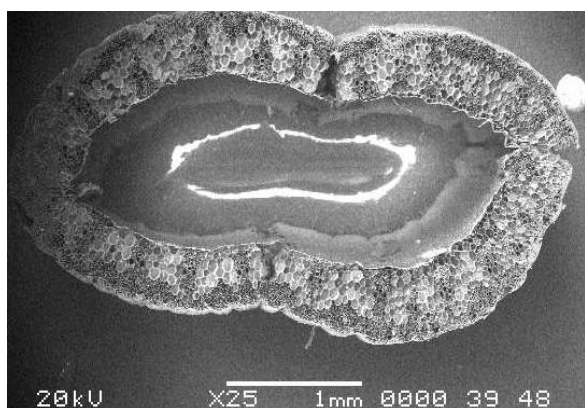


Рисунок 3. – Деформированная трубка соломы (торцевое сечение близкое к овалу, 50 крат)

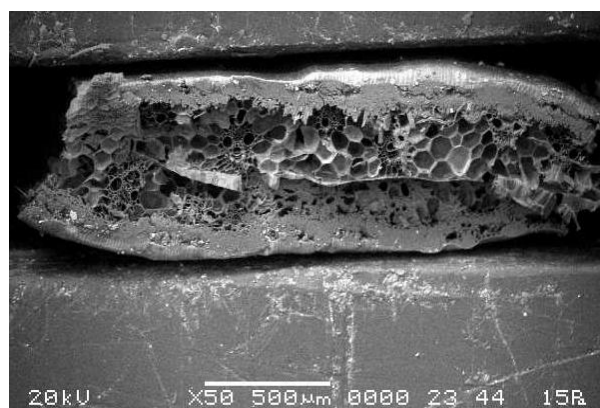


Рисунок 4. – Фрагмент сплюсненной трубки соломы в виде пластинки (торцевое сечение, 50 крат)

Деформированные трубки соломы с овальным очертанием в поперечном сечении сохраняют микроструктуру без значительных разрушений за исключением зон разрыва и смятия, что не влияет на теплоизоляционные свойства материала. В трубках, деформированных до формы пластинок, частично сминается внутренняя область, что может оказывать незначительное негативное влияние на коэффициент теплопроводности теплоизоляционной плиты.

Из полученных изображений фрагментов измельченной соломы следует, что по поперечному контуру (продольным и поперечным граням) происходят значительные разрушения микроструктуры в виде разрывов и смятия ячеек. При этом получаемая рваная и сильно деформированная поверхность должна способствовать повышению адгезии с вяжущим компонентом.

Основываясь на значительном объеме исследований микроструктуры растительных материалов [8–11], полученные данные по результатам электронной микроскопии позволяют предположить, что рисовая лузга обладает достаточно высокими теплоизоляционными свойствами и может применяться не только для производства конструктивно-теплоизоляционных материалов⁶ [4], но и для получения тепловой изоляции. Использование пшеничной соломы в структурообразующей композиции позволит улучшить теплотехнические характеристики теплоизоляционного материала на основе рисовой лузги.

Первоначально определяли коэффициент теплопроводности рисовой лузги как сыпучего материала без использования вяжущего. Лузга засыпалась в измерительное устройство прибора ИТП-МГ4 и подпрессовывалась за счет поджатия смеси крышкой прибора. В итоге плотность рисовой лузги при измерении теплопроводности составила 133,3 кг/м³, что на 27% превысило показатель плотности в насыпном состоянии равный 105 кг/м³. Прибор показал значение коэффициента теплопроводности равное 0,053 Вт/(м·К). Полученный результат указывает на то, что рисовая лузга имеет низкий показатель теплопроводности в насыпном состоянии и при необходимости может использоваться в качестве простой засыпной изоляции. Однако следует учитывать при утеплении зданий засыпной изоляцией, что необходимо предусмотреть защиту от горения при пожаре и загнивания в случае переувлажнения лузги.

⁵ См. сноску 2.

⁶ См. сноску 2.

Далее изучили возможность использования модифицированного жидкого стекла в качестве вяжущего компонента. В жидком виде стекло вводили в количестве 150 и 200 г на экспериментальную плиту. Концентрация жидкого стекла по сухому веществу составляла 45%. Для равномерного распределения тонким слоем жидкого стекла по поверхности структурообразующего материала рисовую лузгу предварительно обрызгивали водой с распылителя в количестве 50 г. Затем вводили вяжущее и тщательно перемешивали. После сушки масса плит составила 320 и 340 г соответственно (составы 2, 3, таблица 1).

Показатели коэффициента теплопроводности плит на рисовой лузге составили 0,06 и 0,062 Вт/(м·К). Таким образом, установлено, что присутствие жидкого стекла в теплоизоляционных плитах на рисовой лузге повышает коэффициент теплопроводности на 13–17%. При этом прослеживается зависимость, чем больше жидкого стекла в структуре плит, тем выше коэффициент теплопроводности. Такая зависимость объясняется относительно большим значением коэффициента теплопроводности самого жидкого стекла в сухом твердом состоянии. По данным исследований [8], коэффициент теплопроводности плиты из жидкого стекла равен 0,305 Вт/(м·К).

Несмотря на прирост теплопроводности, жидкое стекло обеспечивает высокую адгезию с частицами рисовой лузги. Высокой прочности сцепления рисовой лузги с органическими и неорганическими вяжущими не всегда удается достичь по причине присутствия на поверхности скорлупы тонкого воскового слоя.

Необходимо отметить, что по причине малого давления формования или малого расхода жидкого стекла плиты на рисовой лузге держали форму, но имели слабосвязанную структуру. Однако увеличение давления или расхода жидкого стекла приводит к увеличению и без того достаточно высокой плотности равной 170,7–181,3 кг/м³ и при этом повышает коэффициент теплопроводности утеплителя.

В научных исследованиях существует практика использования двухкомпонентных структурообразующих композиционных материалов, обеспечивающих существенное снижение теплопроводности утеплителей⁷ [8; 9; 12]. Для снижения коэффициента теплопроводности плит часть рисовой лузги заменяли пшеничной соломой как эффективным теплоизоляционным материалом, также являющимся отходом растениеводства.

Предварительно рисовую лузгу обрызгивали водой в количестве 50 г, затем вводили модифицированное жидкое стекло и перемешивали. Далее, чередуя с перемешиванием, частями добавляли резанную или измельченную солому. Такой способ перемешивания смеси обеспечивает получение равномерного распределения по объему соломы и достижения однородной структуры при формовании. Результаты исследований по определению плотности, коэффициента теплопроводности и прочности на сжатие при 10% деформации экспериментальных плит приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Составы и свойства плит из смеси лузги и соломы на модифицированном жидком стекле

Составы	Масса плиты, г	Соотношение лузги и соломы	Состав плиты				Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Прочность на сжатие, МПа	Состояние плит
			лузга, г	резанная солома, г	измельченная солома, г	жидкое стекло, г				
1	250	-	250	-	-	-	133,3	0,053	-	-
2	320	-	250	-	-	150	170,7	0,06	-	Слабосвязанная структура
3	340	-	250	-	-	200	181,3	0,062	-	Слабосвязанная структура
4	340	50:50	125	125	-	200	181,3	0,054	0,48	Жесткая, прочная
5	340	50:50	125	-	125	200	181,3	0,059	0,42	Жесткая, прочная
6	320	50:50	125	125	-	150	170,7	0,052	0,39	Поверхностное шелушение
7	320	50:50	125	-	125	150	170,7	0,058	0,35	Поверхностное шелушение
8	340	70:30	175	75	-	200	181,3	0,058	0,44	Жесткая, прочная
9	340	70:30	175	-	75	200	181,3	0,06	0,42	Жесткая, прочная
10	320	70:30	175	75	-	150	170,7	0,055	-	Слабосвязанная структура
11	320	70:30	175	-	75	150	170,7	0,056	-	Слабосвязанная структура
12	305	55:45	125	90	-	200	162,7	0,055	0,44	Жесткая, прочная
13	285	55:45	125	90	-	150	152	0,057	0,38	Поверхностное шелушение

В исследованиях 30 и 50% рисовой лузги по массе заменяли соломой. Плотность плит в сухом состоянии изменялась от 152 до 181,3 кг/м³. Также визуально оценивалось состояние плит после сушки. На рисунке 5 приведена теплоизоляционная плита (состав 4).

Из полученных результатов следует, что наименьший коэффициент теплопроводности 0,052 Вт/(м·К) имеет состав 6 при равном соотношении лузги и соломы при расходе жидкого стекла 150 г на плиту. При этом состояние плиты оценивается как неудовлетворительное, т.к. отмечается поверхностное шелушение лузги и измельченной соломы. Также состав 6 обеспечивает не самый высокий показатель прочности на сжатие. Плиты состава 6 не отвечают потребительским требованиям по качеству.

⁷ Авраменко, В.В. Легкие бетоны на основе растительного сырья и минеральных вяжущих для стеновых ограждений : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / В.В. Авраменко. – Новосибирск, 2010. – 168 с.



Рисунок 5. – Внешний вид плиты на основе смеси рисовой лузги и резанной соломы (состав 4) в приборе ИТП-МГ4

Жесткие и прочные плиты получены на составах 4 и 12. Коэффициенты теплопроводности плит превышают показатели состава 6 незначительно и равны 0,054 и 0,055 Вт/(м·К) соответственно. Теплоизоляционные плиты (составы 4 и 12) обеспечивают максимальные показатели прочности на сжатие и на 13 и 23% соответственно превышают показатели состава 6. Состояние плит составов 4 и 12 оценивается как удовлетворительное.

При анализе показателя теплопроводности отмечается, что показатели плит на резанной соломе (составы 4, 6, 8, 10) в среднем на 10% ниже, чем для составов на измельченной соломе (составы 5, 7, 9, 11). Также установлено, что увеличение процентного содержания соломы обеспечивает снижение коэффициента теплопроводности.

Прочность на сжатие повышается при увеличении расхода жидкого стекла до 23%. Введение резанной соломы по сравнению с применением измельченной соломы повышает прочность на 11–14%.

Снижение коэффициента теплопроводности в составах на основе смеси лузги и соломы объясняется спецификой строения микроструктуры пшеничной соломы, рассмотренной выше.

Повышение прочности плит при введении резанной соломы в сравнении с композициями на измельченной соломе объясняется формированием более прочной пространственной структуры из сплюснутых до пластинок или деформированных до овальной формы трубок соломы.

В ряде работ по исследованию новых теплоизоляционных материалов особое внимание уделяется исследованиям сорбционной влажности при значениях относительной влажности воздуха 40–97% с построением изотерм сорбции [8; 9; 13]. Сорбция водяного пара является главной причиной увлажнения изоляции в конструкциях зданий и относится к основным показателям, влияющим на теплопроводность утеплителей [14; 15]. Имеющийся опыт исследований свидетельствует о том, что только определения показателей плотности, теплопроводности недостаточно для подтверждения эффективной работы тепловой изоляции и долговечности утеплителей. Определение сорбционной влажности изоляционных материалов и структурообразующего растительного сырья является одним из этапов по определению данных показателей.

Исследования сорбции водяных паров проводились на рисовой лузге без вяжущего компонента и на композиционных составах из смеси лузги и соломы с применением модифицированного жидкого стекла. При соответствующей относительной влажности воздуха в эксикаторы помещали по две партии образцов рисовой лузги. Под рисунком 6 партии образцов обозначены М1–М10.

По полученным данным построены зависимости изменения сорбции водяных паров рисовой лузгой во времени (см. рисунок 6). Максимальная сорбционная влажность рисовой лузги соответствует 19,25–19,5% при относительной влажности воздуха 97%. Исходя из опыта таких исследований можно говорить о низком значении сорбции водяных паров лузгой, что является достаточно редкой особенностью, свойственной растительному материалу, произрастающему во влажных климатических условиях с постоянной относительной влажностью воздуха более 80%.

Продолжительность процесса сорбции при относительной влажности воздуха 40–97% составляет 28 суток и находится в средних временных рамках по отношению к другим растительным материалам. При относительной влажности воздуха 60–80% показатели сорбции рисовой лузги находятся в пределах 7,75–12%, что является достаточно низким показателем. Также отмечается, что сорбционная влажность рисовой лузги при относительной влажности воздуха 97% превышает показатель при влажности воздуха 60% только в 2 раза, что также подтверждает низкие значения сорбции и должно положительно влиять на показатель теплопроводности теплоизоляционных плит в условиях эксплуатации.

Однако при относительной влажности воздуха 90% на 41 сутки зафиксировано появление серой плесени на поверхности образцов. Через 32 дня после начала испытаний серая плесень появилась и на образцах, находившихся в эксикаторе с относительной влажностью воздуха 97%. Необходимо отметить, что период между моментом наступления максимальной сорбции и появлением плесени достаточно короткий и составляет от 4 до 13 суток.

Кроме сорбции рисовой лузги исследовали показатель и для двухкомпонентных композиций из смеси лузги и соломы на модифицированном жидком стекле. Исследования сорбции проводили на образцах составов 4, 5, 9, 10 из таблицы 1. При каждой относительной влажности воздуха в эксикаторах испытывали по две партии образцов составов 4, 5, 9, 10. Партия включает пять образцов. Таким образом, сорбцию для каждого состава испытывали на 10 партиях образцов. В условных обозначениях графиков (рисунок 7) партии образцов обозначены N1–N10.

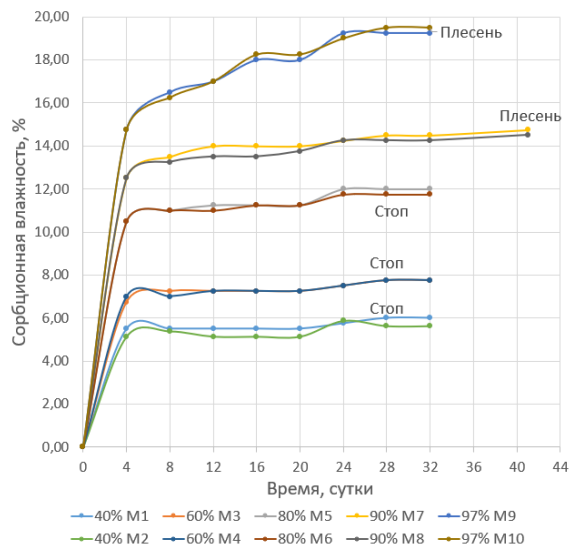


Рисунок 6. – Кинетика сорбции водяных паров рисовой лузгой

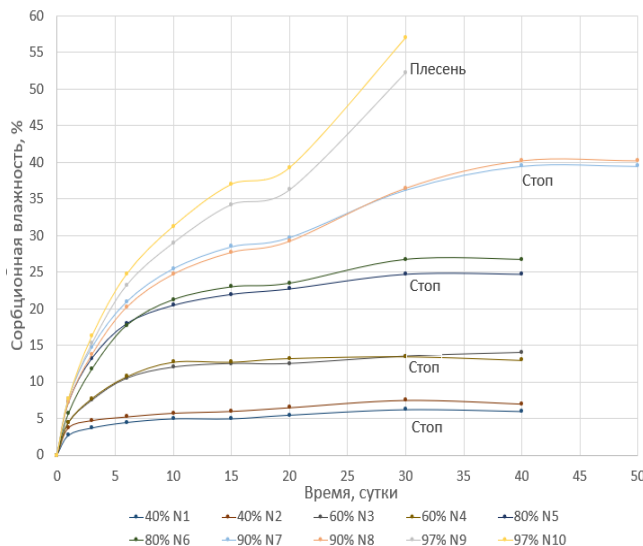


Рисунок 7. – Кинетика сорбции водяных паров (состав 4)

Данные кинетики сорбции водяных паров смесью рисовой лузги и соломы, содержащей жидкое стекло (состав 10), существенно не отличаются от показателей при относительной влажности воздуха 40% и 60%. Превышение на 3% наблюдается при относительной влажности воздуха 60%. Однако существенные отличия появляются при нахождении образцов при относительной влажности 80–97%. Так, уже при влажности воздуха 80% показатель сорбции достигает 20%, что в 1,7 раза выше, чем у показателя рисовой лузги, и период до максимальной сорбции увеличивается на 2 суток.

При относительной влажности воздуха 90% показатель сорбционной влажности состава 10 увеличивается в 2 раза по сравнению со значением сорбции лузги и достигает 30,7%, а период сорбции более продолжительный и составил 40 суток без появления плесени.

Максимальные показатели сорбции, которые удалось зафиксировать, составляют 48,2–49,5% и достигнуты при относительной влажности воздуха 97%. При этом, если рассмотреть кривые изменения сорбции, то можно предположить, что плесень появилась раньше, чем наступил период насыщения сорбционной влагой образцов. Траектории кривых сорбции идут вверх в момент, когда на 30 суток зафиксировано появление плесени.

Сопоставление данных состава 9 и состава 10 не выявило значительных отличий. Показатели сорбционной влажности находятся в близком диапазоне. Идентичность результатов позволяет говорить о том, что при одинаковом соотношении растительного сырья формы и геометрические размеры частиц соломы, а также дозировка модифицированного жидкого стекла в пределах 150–200 г на плиту не оказывают существенного влияния на сорбцию водяных паров композиционными составами 9 и 10.

Изменение соотношения лузги к соломе с 70:30 на 50:50 позволило выявить фактор, влияющий на сорбцию водяных паров композициями. При анализе данных по кинетике сорбции состава 5 установлено увеличение показателей сорбционной влажности по сравнению с составом 10. Отличие в показателях сорбции при относительной влажности воздуха 40 и 60% составляют 1,5–2%. Максимально отличия в значениях сорбции проявляются при относительной влажности 80–97%. При влажности воздуха 80% прирост сорбции относительно значений состава 10 равен 3,6%. Разница при относительной влажности воздуха 90% достигает практически 6%. Показатели сорбции при влажности воздуха 97% отличаются на 3,5% и после 30 суток испытаний на поверхности образцов появилась плесень.

Анализ показателей состава 4 (см. рисунок 7) указывает на аналогичные показатели, что и у состава 5. Таким образом, основным фактором, влияющим на показатель сорбции в сторону увеличения, является количество пшеничной соломы в композиции.

Модифицированное жидкое стекло обеспечивает сильную щелочную среду, что сдерживает образование и развитие плесени в композициях. Так, даже при высоких показателях сорбционной влажности 40,3% (состав 4, при влажности воздуха 90%) плесень в композициях отсутствует. Но уже при сорбции 42,5% (состав 9, относительная влажность воздуха 97%) плесень появляется на образцах.

Как показали наблюдения в процессе определения сорбции композиций, плесень появляется в первую очередь на частицах соломы. В отличие от лузги пшеничная солома менее стойка к образованию плесени на поверхности частиц, т.к. сорбирует больше влаги из воздуха.

Повышение стойкости к образованию плесени за счет введения жидкого стекла подтверждает и тот факт, что, несмотря на высокую сорбцию образцов из смеси лузги и соломы, композиции показывают стойкость к образованию плесени при относительной влажности воздуха 90% на протяжении 50 суток и более. В отличие от рисовой лузги, на образцах которой плесень появилась на 41 сутки при относительной влажности воздуха 90%. Отсутствие плесени на образцах косвенно подтверждает долговечность композиций и эффективную работу тепловой изоляции на их основе.

Закключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что пшеничная солома может использоваться как дополнительный компонент структурообразующей композиции с рисовой лузгой для снижения коэффициента теплопроводности. Замена от 30 до 50% рисовой лузги измельченной или резанной пшеничной соломой в теплоизоляционных составах на жидком стекле позволяет снизить коэффициент теплопроводности до 0,054–0,055 Вт/(м·К) при плотности 162,7–181,3 кг/м³. Кроме того, формируемая соломой и лузгой связанная структура обеспечивает для теплоизоляционных плит прочность на сжатие при 10% деформации в пределах 0,044–0,048 МПа.

2. Присутствие пшеничной соломы снижает теплопроводность композиций на основе рисовой лузги, но при этом существенно повышает сорбционную влажность при относительной влажности воздуха 80–97%. Наибольший показатель сорбции водяных паров равный 57% достигает композиция из смеси лузги и соломы в соотношении 50:50 при относительной влажности 97%. Однако присутствие модифицированного жидкого стекла обеспечивает отсутствие плесени даже при сорбционной влажности материала равной 40% в условиях относительной влажности 90%.

Следует отметить, что при естественной относительной влажности воздуха 60% сорбция утеплителей на основе смеси лузги и соломы в зависимости от содержания соломы в композиции изменяется в пределах 9,75–13,5%, что не может вызвать значительного повышения коэффициента теплопроводности и появление плесени, влекущее за собой биоразрушение тепловой изоляции.

3. По результатам исследования получены образцы теплоизоляционных плит на основе рисовой лузги и пшеничной соломы с вяжущим компонентом в виде жидкого стекла, имеющие абсолютную экологическую чистоту и являющиеся безопасными для здоровья человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sivakumar, K. Performance analysis of downdraft gasifier for agriwaste biomass materials / K. Sivakumar, N.K. Mohan // *Indian J. of Science and Technology*. – 2010. – Vol. 3, iss. 1. – P. 58–60. DOI: 10.17485/ijst/2010/v3i1.14.
2. Ebaid, R.A. Utilization of rice husk as an organic fertilizer to improve productivity and water use efficiency in rice fields / R.A. Ebaid, I.S. El-Refaee // *African Crop Science Conference Proceeding*. – 2007. – Vol. 8. – P. 1923–1928.
3. Evaluation of Industrial By-Products as Sustainable Pozzolan Materials in Recycled Aggregate Concrete / M.F. Alnahhal [et al.] // *Sustainability*. – 2017. – Vol. 9, iss. 5. – P. 767. DOI: 10.3390/su9050767.
4. Барина, Т.А. Монолитный арболит на рисовой лузге / Т.А. Барина, П.В. Сирота, С.А. Удодов // *Научные труды КубГТУ*. – 2020. – № 8. – С. 185–189.
5. Шорсткий, И.А. Исследование основных теплофизических и прочностных свойств теплоизоляционных плит на основе гранул рисовой лузги / И.А. Шорсткий, М.Д. Соснин // *Научные труды КубГТУ*. – 2015. – № 13. – С. 198–207.
6. Apparent thermal conductivity data and related information for rice hulls and crushed pecan shells / D.W. Yarbrough [et al.] // *Therm. Cond.* – 2005. – № 27. – P. 222–230.
7. A review on utilization of biomass from rice industry as a source of renewable energy / J.S. Lim [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – Vol. 16, iss. 5. – P. 3084–3094. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.051.
8. Bakatovich, A. Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin / A. Bakatovich, F. Gaspar, N. Boltrushevich // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 352. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129055.
9. Bakatovich, A. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste / A. Bakatovich, N. Davydenko, F. Gaspar // *Energy and Buildings*. – 2018. – Vol. 180. – P. 72–82. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.032.
10. Building insulation materials based on agricultural wastes / F. Gaspar [et al.] // *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction* / ed. F. Pacheco-Torgal, V. Ivanov, D. Tsang. – Sawston, 2020. – Vol. 8. – P. 149–170. DOI: 10.1016/B978-0-12-819481-2.00008-8.
11. Бакатович, А.А. Основные свойства теплоизоляционных плит с применением мха сфагнума, тростника и соломы / А.А. Бакатович // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки*. – 2018. – № 8. – С. 35–42.
12. Colleta, F. Hemp-Straw Composites: Thermal and Hygric Performances / F. Colleta, S. Prétota, C. Lanosa // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 139. – P. 294–300. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.211.
13. Romanovskiy, S. Effect of Modified Liquid Glass on Absorption Humidity and Thermal Conductivity of Flax Fiber Slabs / S. Romanovskiy, A. Bakatovich // *IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 660. DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012072.
14. Пастушков, П.П. О проблемах определения теплопроводности строительных материалов / П.П. Пастушков // *Строительные материалы*. – 2019. – № 4. – С. 57–63. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63.
15. Киселев, И.Я. Влияние равновесной сорбционной влажности строительных материалов на сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий / И.Я. Киселев // *Жилищное строительство*. – 2013. – № 6. – С. 40–44.

REFERENCES

1. Sivakumar, K. & Mohan, N.K. (2010). Performance analysis of downdraft gasifier for agriwaste biomass materials. *Indian J. of Science and Technology*, 3 (1), 58–60. DOI: 10.17485/ijst/2010/v3i1.14.
2. Ebaid, R.A. & El-Refae, I.S. (2007). Utilization of rice husk as an organic fertilizer to improve productivity and water use efficiency in rice fields. *African Crop Science Conference Proceeding*, 8, 1923–1928.
3. Alnahhal, M.F., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Alqedra, M.A., Mo, K.H. & Sumesh, M. (2017). Evaluation of Industrial By-Products as Sustainable Pozzolan Materials in Recycled Aggregate Concrete. *Sustainability*, 9 (5), 767. DOI: 10.3390/su9050767.
4. Barinova, T.A., Sirota, P.V. & Udodov, S.A. (2020). Monolitnyi arbolit na risovoi luzge [Monolithic arbolyte on rice lug]. *Nauchnye trudy KubGTU [Scientific Works of the Kuban State Technological University]*, (8), 185–189. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Shorstkii, I.A. & Sosnin, M.D. (2015). Issledovanie osnovnykh teplofizicheskikh i prochnostnykh svoystv teploizolyatsionnykh plit na osnove granul risovoi luzgi [Thermal and strength properties studying of based on rice husk granules insulation boards]. *Nauchnye trudy KubGTU [Scientific Works of the Kuban State Technological University]*, (13), 198–207. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Yarbrough, D.W., Wikes, K.E., Olivier, P.A., Graves, R.S. & Vohra, A. (2005). Apparent thermal conductivity data and related information for rice hulls and crushed pecan shells. *Therm. Cond.*, (27), 222–230.
7. Lim, J.S., Manan, Z.A., Alwi, S.R.W. & Hashim, H. (2012). A review on utilization of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (5), 3084–3094. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.051.
8. Bakatovich, A., Gaspar, F. & Boltrushevich, N. (2022). Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin. *Construction and Building Materials*, 352. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129055.
9. Bakatovich, A., Davydenko, N. & Gaspar, F. (2018). Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. *Energy and Buildings*, 180, 72–82. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.032.
10. Gaspar, F., Bakatovich, A., Davydenko, N. & Joshi, A. (2020). Building insulation materials based on agricultural wastes. In F. Pacheco-Torgal (Eds.), V. Ivanov (Eds.) & D. Tsang (Eds.) *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Vol 8. Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction* (149–170). Sawston: Woodhead Publishing. DOI: 10.1016/B978-0-12-819481-2.00008-8.
11. Bakatovich, A.A. (2018). Osnovnye svoystva teploizolyatsionnykh plit s primeneniem mkha sfagnuma, trostnika i solomy [The main properties of thermal insulation plates with the use of sphagnum moss, reeds and straw]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences]*, (8), 35–42. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Colleta, F., Prétota, S. & Lanosa, C. (2017). Hemp-Straw Composites: Thermal and Hygric Performances. *Energy Procedia*, 139, 294–300. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.211.
13. Romanovskiy, S. & Bakatovich, A. (2019). Effect of Modified Liquid Glass on Absorption Humidity and Thermal Conductivity of Flax Fiber Slabs. *IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering*, 660. DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012072.
14. Pastushkov, P.P. (2019). O problemakh opredeleniya teploprovodnosti stroitel'nykh materialov [On the Problems of Determining the Thermal Conductivity of Building Materials]. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, (4), 57–63. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63.
15. Kiselev, I.Y. (2013). Vliyanie ravnovesnoi sorbtionnoi vlazhnosti stroitel'nykh materialov na soprotivlenie teploperedache ograzhdayushchikh konstruksii zdaniy. *Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing Construction]*, (6), 39–40. (In Russ.).

Поступила 12.10.2022

INSULATING COMPOSITES BASED ON A MIXTURE OF RICE HUSK AND STRAW

A. BAKATOVICH, YI ZHANG
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)
F. GASPAR
(Leiria Polytechnical Institute, Portugal)

The present study is aimed at obtaining environmentally friendly thermal insulation slabs containing rice husk as the main structure-forming material. The second component of the structure-forming composition is wheat straw. The experimental data on the physical properties of thermal insulation slabs, included the measurement of density, thermal conductivity, sorption moisture and compressive strength. The use of straw in an amount of up to 50% of the total mass of the composition allows to reduce the coefficient of thermal conductivity of insulation slabs to 0,054 – 0,055 W/(m·K). The indicators of the thermal conductivity coefficient of insulation slabs are due to the microstructure of husk and wheat straw, which is confirmed by the results of electron microscopy obtained in the course of research. Liquid glass ensures the formation of a rigid and durable structure of environmentally friendly thermal insulation boards and prevents damage to the insulation by rodents.

Keywords: rice husk, wheat straw, thermal insulation slabs, thermal conductivity, sorption moisture.

УДК 72.03(476.5)

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-10-15

ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРНО-КОМПОЗИЦИОННОГО РЕШЕНИЯ КОСТЕЛА В Д. СОЛЫ

канд. архитектуры, доц. А.С. ДАВИДОВИЧ, Т.Л. ДАВИДОВИЧ
(Гродненский государственный университет имени Янки Купалы)

канд. техн. наук, доц. Е.Г. КРЕМНЁВА
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье рассмотрены и подвергнуты аналитической оценке особенности архитектурно-пространственной организации и композиционного строя католического культового объекта XX в., принципы и методы формообразования которого не вписываются в формат традиционных канонов и параметров архитектурных решений костелов. Будучи, в силу своих необычных образных характеристик, объектом притяжения многочисленных туристов, костел Богоматери Руженцовой в д. Солы Гродненской области, тем не менее, несправедливо, на наш взгляд, обделен вниманием профессиональных специалистов-архитекторов. Если не считать кратких сведений в Wikipedia, рекламных роликов на просторах интернета, а также скупой информации в нескольких литературных источниках, сколько-нибудь серьезных исследований архитектурных особенностей уникального объекта обнаружить не удалось. При этом наблюдаются разночтения в оценке его стилевой принадлежности – модерн, необарокко, неоготика? В работе на основе детального изучения и обобщения литературных источников, интернет-ресурсов и визуального натурного обследования предложена авторская версия относительно стилевой принадлежности данного объекта.

Ключевые слова: памятник архитектуры, образные характеристики, архитектурная композиция, архитектурный стиль, неоготика, необарокко, модерн.

Введение. История возникновения костела Богоматери Руженцовой уходит своими корнями в далекий XVI век, когда в 1589 г. в местечке Солы был основан католический приход. Тогда же на средства гетмана Христофора Радзивилла был построен первый деревянный костел, который, однако, вскоре был разрушен¹. Второй костел в 1612 г. строил уже новый хозяин д. Солы – Виленский воевода Ян Кишка, но и этот костел был разрушен в 1656 г. во время войны России с Речью Посполитой. В 1699 г. костел был восстановлен, после чего просуществовал до 1794 г. (восстание Костюшки). В 1812 г. во время французского нашествия костел был вновь разрушен – на этот раз до основания [4, с. 30–33]. Новый костел был возведен в 1849 г. и освящен епископом Вацлавом Жилинским. Но и это здание просуществовало недолго. В начале XX в. завершилось строительство очередного деревянного храма. Однако, по свидетельству очевидцев, его отличала неоправданная скупость и невыразительность внешнего облика, а также очевидная стилевая «невнятность»². Именно это обстоятельство послужило побудительным мотивом для возведения нового, каменного костела, который и был построен по проекту архитектора А. Дубановича в 1926–1934 гг., но уже из кирпича и под руководством ксендза Бонифация Трахневича. К сожалению, ничего, что позволило бы представить и хоть как-то воспроизвести архитектурный облик предыдущих храмов, обнаружить не удалось. Но то, что костел Богоматери Руженцовой, который величественно возвышается в центре д. Солы, заслуживает самого пристального внимания не только в качестве охраняемого государством исторического памятника, но и как новаторское произведение архитектуры, не вызывает сомнения.

Цель исследования состояла в определении стилевой направленности данного объекта и установлении некоторых закономерностей формирования его объемно-пространственной структуры. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- изучить и обобщить материалы литературных источников, архивные данные, информацию из интернет-ресурсов;
- выполнить визуальное обследование, включая натурные обмеры, исследуемого объекта для определения его линейных объемно-планировочных параметров;
- осуществить аналитическую оценку полученных данных, обобщить их, представив полученные выводы в заключении.

Как уже было сказано выше, сколько-нибудь существенную информацию о структурных и стилистических параметрах костела Богоматери Руженцовой в д. Солы обнаружить не удалось, за исключением кратких сведений в книгах А.Н. Кулагина³ [3, с. 202–203], С.В. Хоревского [4, с. 30–33], А.И. Локотко [2, с. 307], да многочисленных фотографий, представленных на просторах интернета любителями путешествий. При этом не вызывает сомнений тот факт, что, несмотря на относительную «молодость», костел Богоматери Руженцовой являет собой уникальное произведение архитектуры со своей неповторимой гармонией, способной вызывать восторженные, порой необъяснимые, ощущения у представителей самых разных слоев населения. Очевидно, данное обстоятельство неслучайно и обусловлено некими особенностями и закономерностями архитектурно-композиционного строя объекта, воспринимаемыми на подсознательном уровне.

¹ Архітэктура Беларусі: Энцыклапедычны даведнік / рэдкал.: А.А. Воінаў [і інш.]. – Мінск : БелЭн, 1993. – 620 с. (см. с. 284).

² Кулагін, А.М. Каталіцкія храмы на Беларусі: Энцыклапедычны даведнік / А.М. Кулагін ; маст. І.І. Бокі. – 2-е выд. – Мінск : БелЭн, 2001. – 216 с. (см. с. 147).

³ См. сноску 2, с. 147.

Основная часть. Именно скупость и невыразительность внешнего облика предыдущего здания послужили предпосылкой для возведения в 1926–1934 гг. нового кирпичного костела, проект которого был выполнен архитектором А. Дубановичем. Средства (540 тыс. злотых) были собраны парфиянами. Строительство велось под руководством Бонифация Трахневича⁴.

Костел Богородицы Руженцовой расположен в центральной части небольшого (около 2600 жителей) агрогородка Сола Сморгонского района Гродненской области. Благодаря своим габаритам он выступает неоспоримой градостроительной доминантой в структуре одноэтажной застройки поселка (рисунок 1, а, б). Костел виден практически с любой визуальной точки и однозначно привлекателен и интересен в любом ракурсе. Без сомнения, его внешний облик подобен необычному, завораживающему скульптурному произведению. На первый взгляд объемно-пространственная структура объекта кажется случайным набором разнохарактерных объемных форм, соединенных в некое целое, но при этом вас не покидает ощущение единства и целостности архитектурной композиции, не поддающейся традиционному логическому осмыслению и объяснению привычными категориями. Определенно, можно утверждать, что костел выглядит совсем нетипично для культового сооружения того времени.



а



б

а – вид костела с юго-восточного направления; б – то же, с северо-западного направления

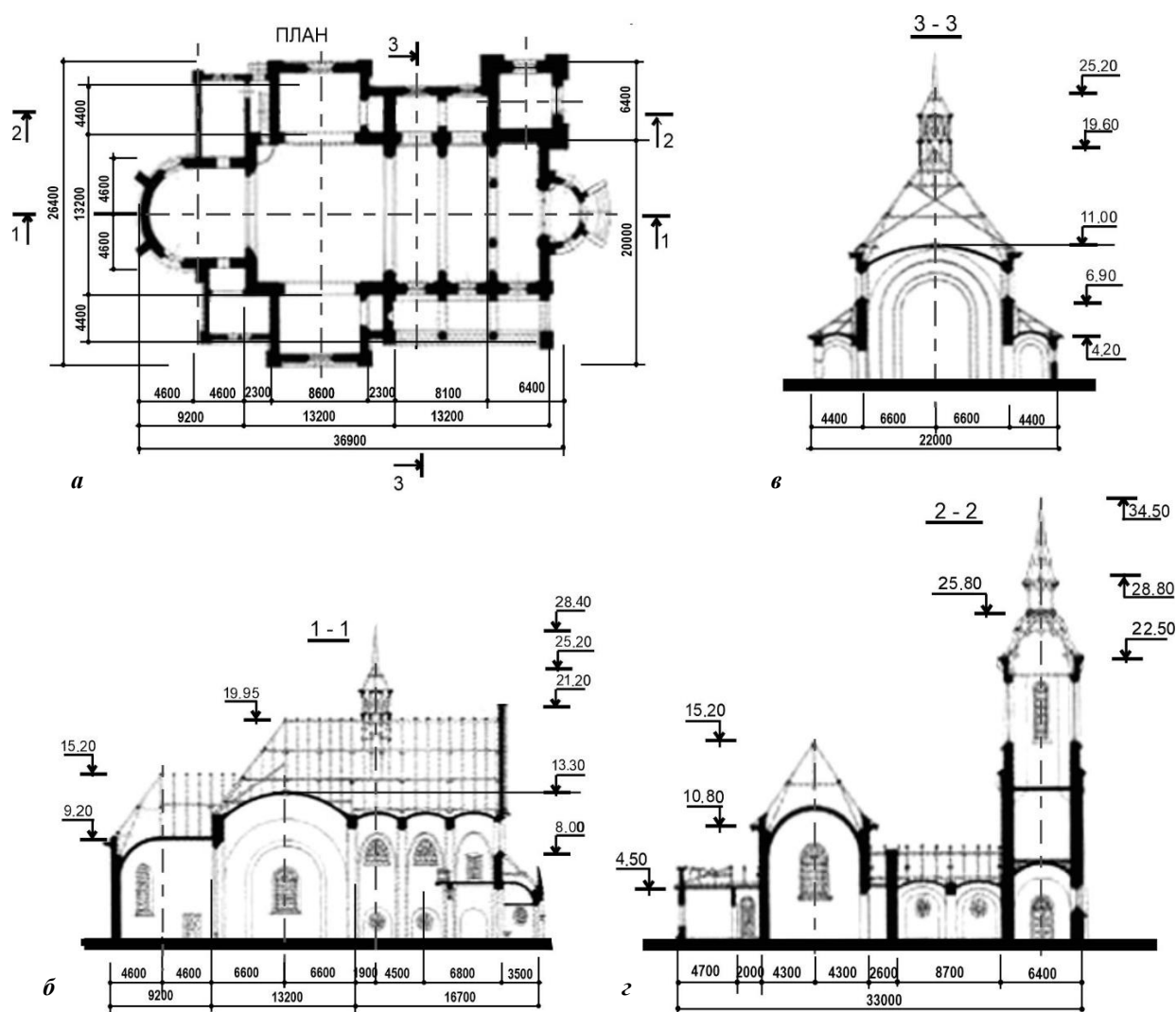
Рисунок 1. – Общий вид костела

Очевидно, что авторская концепция отвергает требование обязательной фронтальной симметрии, утверждая тем самым тезис о том, что только творческая свобода способна обеспечить искомый визуальный эффект «живого композиционного движения архитектурных масс» [5, с. 135]. Безусловно, автор демонстрирует стремление к достижению художественной выразительности и пластичности объемно-пространственной структуры здания. Как уже отмечалось выше, композиция объекта рассчитана на пространственное восприятие, что, несомненно, обусловлено его динамичной асимметричностью, которую обеспечивает примыкание башни-колокольни с одной стороны фасада (рисунок 2, а, з).

В целом, каменный костел имеет асимметричную многоплановую объемно-пространственную композицию, основу которой составляет объем главного нефа молитвенного зала, к которому присоединены более низкие крылья трансепта и полукруглая в плане апсида с покрытием конической формы (см. рисунок 2, а, б).

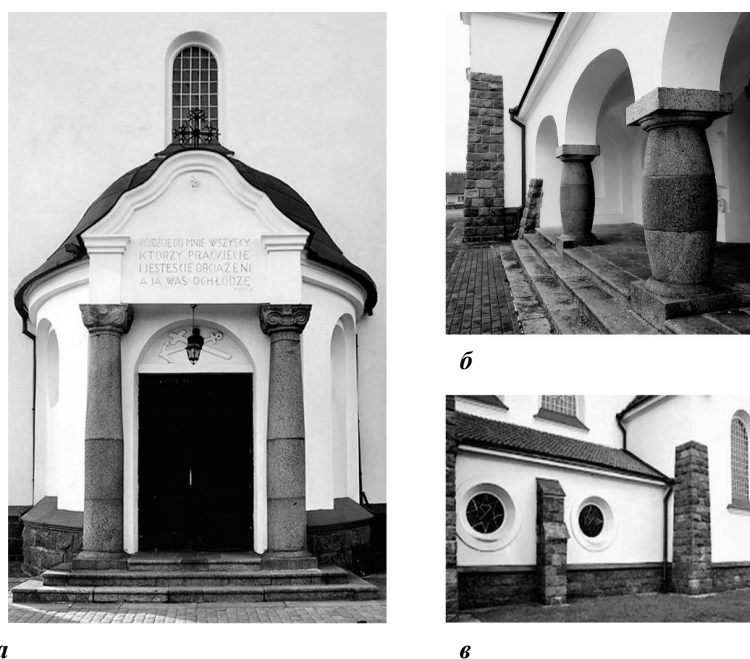
Дополнительное своеобразие сооружению придают боковые галереи-аркады (рисунок 3, б), создающие иллюзию трехнефного объема и явно претендующие на ренессансные реминисценции, а также полукруглый в плане входной притвор с двухколонным современным портиком (рисунок 3, а). Вертикальная доминанта здания являет собой боковую двухъярусную башню-звонницу с двойным фигурным барочным куполом, увенчанным шпилем-крестом с характерными неоготическими признаками. Следует отметить тот любопытный факт, что фасады костела практически по всему периметру, включая апсиду, обрамлены выложенными из известняковых блоков контрфорсами, стилизованными под пилястры (явные рудименты готики), а в качестве завершения использованы фигурные фронтоны с барочными волютами (рисунок 3, в). Пластическое богатство композиции усиливается противопоставлением вертикального и горизонтального движения архитектурных масс [2, с. 307].

⁴ См. сноску 2, с. 147.



а – план; б – разрез 1-1; в – разрез 3-3; г – разрез 2-2

Рисунок 2. – Объемно-планировочные параметры



а

в

а – входной притвор; б – аркада; в – контрфорсы

Рисунок 3. – Фрагменты фасадов и архитектурные элементы

В композиции интерьера главенствует подкупольное пространство средокрестия, в котором соединились перекрытый цилиндрическим сводом неф, более узкая апсида с коническим покрытием и поперечные крылья широкого транспта (рисунок 4). Над входом разместились хоры с органом на двух колоннах.

В конце 1930-х гг. святию украсил фресковыми росписями художник Петр Сергеевич. Особенно выделяются «Сошествие Святого Духа на апостолов» в куполе, «Богоматерь со святыми Станиславом и Казимиром» в главном алтаре и «Ангельское пение» над хорами.



Рисунок 4. – Фрагмент интерьера

Очень интересны и сюжеты на стенах пресбитерия – «Защита Ченстоховы» и «Чудо над Вислой». К сожалению, роспись часовни св. Франциска (справа при входе в костел) не сохранилась [2, с. 307]. Отдельно следует отметить красивый орган и другие элементы, отлично гармонирующие между собой, сохраняя при этом идеальный баланс между перенасыщенностью и минимализмом элементов.

Сегодня в костеле пять алтарей: главный – Матери Божьей Ружанцовой, левый боковой – Пресвятого Сердца Господа Иисуса, правый – Матери Божьей Остробрамской, еще два алтаря находятся в часовнях, сделанных в Крыльях транспта – св. Иосифа в левой и св. Антония в правой⁵.

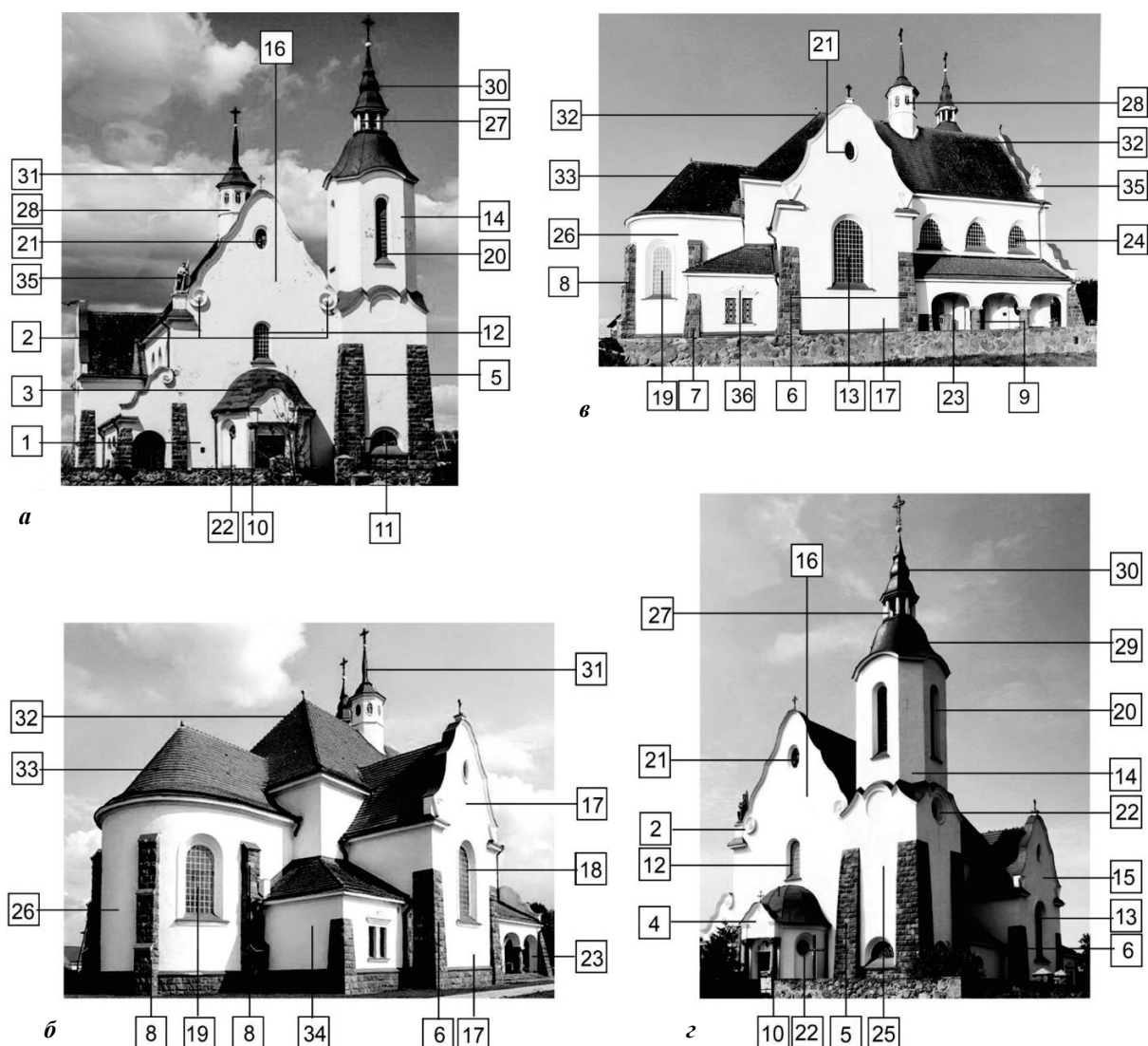
В целом, анализируя план и разрезы здания (см. рисунок 2) вкупе с интерьером, можно сделать вывод о том, что по своей объемно-пространственной структуре костел в Солах мало чем отличается от множества костелов, отнесенных к стилю необарокко. Единственное существенное отличие – ассиметричное расположение башни-звонницы относительно традиционного крестообразного в плане объема. Но именно этот прием позволил придать объекту композиционное своеобразие, которое затем получило замечательное продолжение путем использования различных признаков стилевой принадлежности в прочих элементах композиции, объединенных единым архитектурным замыслом.

Теперь позволительно будет вернуться к вопросу – какова же стилевая направленность исследуемого объекта, и правомочны ли категоричные суждения и оценки отдельных авторов о безусловной его принадлежности стилю модерн⁶ или барокко (необарокко) [2, с. 307]. А может быть – просто эклектика? [3, с. 202–203].

В этой связи представляется целесообразным провести поэлементную аналитическую оценку объекта, то есть условно дифференцировать основные компоненты и части здания по стилевым признакам с тем, чтобы выявить количественные соотношения этих признаков в архитектуре костела, не забывая при этом, что все анализируемые элементы находятся в совокупном синтетическом композиционном единстве (рисунок 5, а, б, в, г).

⁵ См. сноску 2, с. 147.

⁶ См. сноску 2, с. 147.



а – восточный фасад; б – юго-восточный фасад; в – южный фасад; г – северо-восточный фасад

Рисунок 5. – Фрагменты фасадов и архитектурные элементы

В ходе поэлементной оценки фасадов костела выяснилось, что не всегда тот или иной элемент может быть однозначно отнесен к определенному стилю, поскольку нередко в архитектуре разных эпох и стилей встречаются примеры «перефразирования классических и иных архитектурных мотивов» [5, с. 135]. Исследованию подверглись 36 различных фрагментов и элементов объекта. В результате предлагается нижеприведенная авторская версия стилиевой принадлежности выбранных компонентов рассматриваемого архитектурного объекта.

- 1 – стена с фронтоном восточного фасада – необарокко;
- 2 – декоративный элемент волюта – необарокко;
- 3 – входной притвор – модерн;
- 4 – фронтон входного притвора – модерн, необарокко;
- 5, 6, 7, 8 – контрфорсы (пилястры) из камня – неоготика;
- 9 – каменная колонна с базой и капителью – модерн с заимствованием элементов ренессанса;
- 10 – портик входного притвора – модерн, необарокко, ренессанс;
- 11 – окно арочное параболическое – модерн;
- 12, 13, 18, 19, 20 – окно, вытянутое по вертикали с арочным завершением, – романский стиль, барокко, неоготика;
- 14 – верхний восьмиугольный ярус башни-звонницы – модерн, неоготика;
- 15 – фронтоны северного трансепта – необарокко;
- 16 – фронтоны восточного фасада – необарокко;
- 17 – стена с фронтоном южного трансепта – необарокко;
- 21 – овальное окно на фронтонах восточного, южного, западного фасадов – необарокко, модерн;
- 22 – круглое окно (розетка) в стене притвора и северной стене нижнего яруса башни-звонницы – ренессанс, необарокко, модерн;
- 23 – аркада на южном фасаде – ренессанс, модерн;

- 24 – арочно-параболическое окно на южном фасаде – модерн;
- 25 – восточная стена нижнего яруса башни-звонницы – неоготика, необарокко;
- 26 – стена апсиды – романский стиль, неоготика, необарокко;
- 27 – надстройка над куполом башни-звонницы – ренессанс, необарокко;
- 28 – восьмигранная сигнатурка – неоготика, необарокко;
- 29 – купол башни-звонницы – необарокко;
- 30 – шпиль башни-звонницы – необарокко, неоготика;
- 31 – шпиль сигнатурки – необарокко, неоготика;
- 32 – черепичная двускатная крыша над главным нефом – романский стиль, неоготика, необарокко;
- 33 – черепичная коническая крыша над апсидой – романский стиль, неоготика, необарокко;
- 34 – придел между апсидой и южным трансептом – неоготика, необарокко;
- 35 – скульптурная фигура – ренессанс, романский стиль;
- 36 – надоконный декоративный барельефный элемент – необарокко, ампир.

Заключение. Таким образом, аналитический обзор объемно-пространственных и композиционных характеристик исследуемого объекта, включая данные поэлементного анализа, свидетельствует о безусловном стилевом многообразии архитектурного решения костела Богоматери Руженцовой с очевидным преобладанием признаков необарокко, модерна и, в меньшей степени, неоготики, а также наличием отдельных мотивов, характерных для ренессанса и романского стиля. Является ли такое, на первый взгляд, странное сочетание стилевых характеристик случайным? Представляется, что ответ на этот вопрос заключен в том необъяснимом эмоциональном воздействии данного объекта на всех, кто имел счастливую возможность его лицезреть. Очевидно, что мы можем наблюдать уникальный композиционный прием – «сочетание несочетаемого», который подвластен только истинному Мастеру.

Исходя из вышеизложенного, предлагается определить стиль архитектурного объекта «Костел Богоматери Руженцовой в д. Соля», как романтическая эклектика с преобладанием признаков необарокко, модерна и неоготики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Забалуева, Т.Р. История архитектуры и строительной техники : учеб. / Т.Р. Забалуева. – М. : Эксмо, 2007. – 736 с.
2. Архітэктура Беларусі: нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславянскім і еўрапейскім кантэкстах : у 4 т. / рэдкал.: А.І. Лакотка [і інш.]. – Мінск : Беларус. навука, 2007. – Т. 3, Кн. 2 : Другая палова XIX – пачатак XX ст. – 549 с.
3. Кулагін, А.М. Эклектыка. Архітэктура Беларусі другой паловы XIX – пачатку XX ст. / А.М. Кулагін. – Мінск : Ураджай, 2000. – 304 с.
4. Харэўскі, С.В. Культывае дойлідства Заходняй Беларусі 1915–1940 гг. / С.В. Харэўскі. – Вільня : ЕГУ, 2008. – 102 с.
5. Шамрук, А.С. Архитектура Беларуси XX–XXI в.: эволюция стилей и художественных концепций / А.С. Шамрук. – Минск : Белорус. наука, 2007. – 335 с.

REFERENCES

1. Zabalueva, T.R. (2007). *Istoriya arkhitektury i stroitel'noi tekhniki*. Moscow: Eksmo. (In Russ.).
2. Lakotka, A.I., Gabrus', T.V., Kulagin, A.M., Marozau, B.F., Marozava, E.B., Sardarau, A.S., Chanturyya, J.U. & Zaleskaya, G.L. (2007). *Arkhitektura Belarusi: narysy evalyutsyi va uskhodneslavyanskim i eurapeiskim kontekstse*: u 4 t. T. 3, Kn. 2: Drugaya palova XIX – pachatak XX st. Minsk: Belarus. navuka. (In Belarus.).
3. Kulagin, A.M. (2000). *Eklektyka. Arkhitektura Belarusi drugoi palovy XIX – pachatku XX st.* Minsk: Uradzhai. (In Belarus.).
4. Khareuski, S.V. (2008). *Kul'tavae doilidstva Zakhodnyai Belarusi 1915–1940 gg.* Vilnius: EGU. (In Belarus.).
5. Shamruk, A.S. (2007). *Arkhitektura Belarusi XX–XXI v.: evolyutsiya stilei i khudozhestvennykh kontsepcii*. Minsk: Belorus. nauka. (In Russ.).

Поступила 15.11.2022

FEATURES OF THE ARCHITECTURAL AND COMPOSITIONAL SOLUTION OF THE CHURCH IN THE VILLAGE OF SOLY

A. DAVIDOVICH, T. DAVIDOVICH
(Yanka Kupala State University of Grodno)
A. KREMNEVA
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article examines and analytically evaluates the features of the architectural and spatial organization and compositional structure of the Catholic cult object of the 20th century, the principles and methods of shaping which do not fit into the format of traditional canons and parameters of architectural solutions of churches. Being, due to its unusual figurative characteristics, the object of attraction of numerous tourists, the Church of Our Lady of Ruzhentsova in the village of Soly, Grodno region, nevertheless, unfairly, in our opinion, is deprived of the attention of professional specialists-architects. Apart from brief information in Wikipedia, commercials on the Internet, as well as stingy information in some literary sources, it was not possible to find any serious studies of the architectural features of the unique object. At the same time, there are discrepancies in the assessment of his style affiliation – modern, neo-Baroque, non-Gothic? In the work, based on a detailed study and generalization of literary sources, Internet resources and visual field survey, the author's version regarding the stylistic affiliation of this object is proposed.

Keywords: architectural monument, figurative characteristics, architectural composition, architectural style, neo-Gothic, neo-Baroque, modern.

УДК 624.011.1

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-16-21

СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ НОРМ РАСЧЕТА СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАГЕЛЬНОГО ТИПА

канд. техн. наук, доц. В.В. ЖУК, Е.С. МАТВЕЕНКО
(Брестский государственный технический университет)

В статье приведена хронология разработки нормативной документации по расчету и проектированию деревянных конструкций в Республике Беларусь. Проведен анализ методики расчета симметричных двухсрезных соединений деревянных элементов на металлических нагелях по строительным правилам СП 5.05.01-2021 и нормам зарубежных стран, гармонизировавших строительные нормы со стандартом Еврокод 5 с учетом национальных приложений. Выявлены отличия положений по расчету соединений на металлических нагелях в части назначения величины частного коэффициента свойств материалов соединения. Отмечен разный подход к назначению технологических параметров при изготовлении строительных конструкций с применением металлических нагелей. Выполнен сравнительный расчет стыка нижнего пояса фермы с двухсторонними деревянными накладками на болтах. Произведена оценка результатов расчета по строительным нормам Республики Беларусь, Китая, Польши, Украины и Литвы. Выявлено, что введение национальных приложений, установленных национальными органами стандартизации, влияет на результаты расчета соединений деревянных элементов на нагелях.

Ключевые слова: нормы проектирования, деревянные конструкции, соединение, металл, стержень, болт, несущая способность.

Введение. Беларусь, как и другие союзные республики, ставшие независимыми государствами, наравне с Россией объявили себя правопреемниками нормативной базы СССР. Проектирование деревянных конструкций осуществлялось в соответствии со СНиП II-25-80¹, введенным в действие с 1 января 1982 года. В 2001 году были разработаны нормы Республики Беларусь СНБ 5.05.01-2000², а через 10 лет – технический кодекс установившейся практики ТКП 45-5.05-146³. Со временем данные нормативные документы были дополнены новыми положениями в части расчета деревянных конструкций по предельным состояниям (расчетные значения нагрузок, коэффициенты условий работы и т.д.). С учетом появления новых механических связей для соединения деревянных элементов (металлические зубчатые пластины, наклонно вклеенные стержни), были введены положения по расчету и конструированию данных соединений. В то же время положения по расчету соединений нагельного типа, в частности соединений деревянных элементов на цилиндрических нагелях, практически не изменились по сравнению со СНиП II-25-80.

В начале 80-х годов прошлого столетия Еврокомиссия развернула широкую деятельность в части создания гармонизированных технических правил проектирования зданий, заменяющих различные правила, применяемые в разных странах – членах ЕС. На первом этапе Еврокоды использовались параллельно с национальными стандартами. Такой «мягкий» переход, в том числе к Еврокоду 5, позволил нашим соседям (Польша, Чехия и др.) разработать национальные приложения (со значениями параметров, установленных национальными органами стандартизации), обеспечить проектировщиков нормативно-методической литературой, переиздать учебники и пособия для расчета конструкций из древесины.

Беларусь в 2010 году присоединилась к прогрессивным наработкам Европейского сообщества: в нашей стране были разработаны и утверждены Минстройархитектуры 58 технических кодексов установившейся практики, идентичных Еврокодам, по расчету и проектированию конструкций из различных материалов. В это же время с целью повышения конкурентоспособности отечественных строительных материалов и изделий утверждено в качестве национальных 709 европейских EN и 8 международных ISO стандартов⁴.

1 января 2010 года был введен в действие технический кодекс установившейся практики ТКП EN 1995-1-1-2009⁵, идентичный европейскому стандарту EN 1995-1-1⁶. С целью обеспечения проектировщиков нормативной литературой в 2013 году был введен в действие ТКП 45-5.05-175-2012⁷, установивший правила расчета деревянных конструкций при проектировании в соответствии с ТКП EN 1995-1-1. После ввода в действие строительных правил

¹ Деревянные конструкции. Нормы проектирования : СНиП II-25-80. – Введ. 01.01.82. – Москва : Стройиздат, 1983. – 31 с.

² Деревянные конструкции : СНБ 5.05.01-2000. – Введ. 01.07.01. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2001. – 70 с.

³ Технический кодекс установившейся практики. Деревянные конструкции. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-5.05-146-2009. – Введ. 01.01.10. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2009. – 63 с.

⁴ Лишай, И.Л. Европейские подходы в техническом регулировании строительной отрасли Республики Беларусь / И.Л. Лишай // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского Союза в области строительства : материалы Междунар. науч.-метод. семинара, Минск, 22–23 мая 2013 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В.Ф. Зверев [и др.]. – Минск, 2013. – С. 7–13.

⁵ Технический кодекс установившейся практики. Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1995-1-1-2009. – Введ. 01.01.10. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 98 с.

⁶ Eurocod 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings : EN 1995-1-1:2004+A1:2004. – Introduced 16.04.04. – Brussel : European Committee for standardization, 2004. – 121 p.

⁷ Технический кодекс установившейся практики. Деревянные конструкции. Правила расчета : ТКП 45-5.05-275-2012 (02250). – Введ. 01.06.13. – Минск : Минстройархитектуры, 2013. – 111 с.

СП 5.05.01-2021⁸ в Брестском государственном техническом университете изданы методические указания по расчету ограждающих и несущих конструкций покрытия [1–3].

Ниже приведены результаты сравнительного анализа методики расчета соединений деревянных элементов на цилиндрических нагелях, в том числе и болтах, реализованной в нормативных документах и учебно-методических изданиях ряда стран, гармонизировавших строительные нормы по проектированию деревянных конструкций со стандартом Еврокод 5 с учетом национальных приложений.

Методика расчета симметричных двухсрезных соединений деревянных элементов на нагелях по отечественным нормам. Расчетное значение несущей способности $F_{v,Rd}$ для одного среза нагеля в соединении определяется по формуле:

$$F_{v,Rd} = k_{\text{mod}} \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M}, \quad (1)$$

где k_{mod} – коэффициент модификации⁹;

$F_{v,Rk}$ – характеристическое значение несущей способности для одного среза нагеля в соединении, рассчитываемое по формулам¹⁰ и принимаемое равным минимальному значению из всех расчетных величин;

γ_M – частный коэффициент свойств материалов и изделий¹¹.

Минимальное характеристическое значение несущей способности для каждой из плоскостей сдвига на один нагель в двухсрезных соединениях древесины с древесиной определяется из выражений:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d, & (a) \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d, & (б) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, & (в) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, & (г) \end{cases} \quad (2)$$

где $f_{h,i,k}$ – характеристическое значение сопротивления древесины i -го элемента соединения вдавливанию нагеля плашмя по направлению волокон и определяемое по формуле: $f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k$;

здесь ρ_k – характеристическое значение плотности древесины, кг/м³¹²;

d – диаметр нагеля, мм;

t_1 – толщина крайнего элемента;

t_2 – толщина среднего элемента;

β – коэффициент, учитывающий отношение характеристического значения сопротивления материала элемента 1 и элемента 2 при вдавливании в них жесткого нагеля плашмя, определяемый по формуле: $\beta = f_{h,2,k} / f_{h,1,k}$;

$M_{y,Rk}$ – характеристическое значение момента, вызывающего образование пластического шарнира в поперечном сечении нагеля, определяемое по формуле: $M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6}$;

здесь $f_{u,k}$ – характеристическое значение прочности материала нагеля при его растяжении;

$F_{ax,Rk}$ – характеристическое значение несущей способности нагеля при выдергивании из элемента соединения, определяемое в соответствии с правилами 9.4¹³.

Технический кодекс установившейся практики ТКП EN 1995-1-1-2009 и строительные правила СП 5.05.01-2021, по сравнению с методикой расчета по СНиП II-25-80, учитывают большее число параметров, влияющих на величину несущей способности одного среза нагеля в соединениях древесины с древесиной: учитываются механические характеристики материалов (характеристическое значение сопротивления вдавливанию нагеля плашмя, характеристическое значение момента, вызывающего образование пластического шарнира в поперечном сечении нагеля, характеристическое значение несущей способности нагеля при выдергивании); плотность древесины.

Результаты сравнительного расчета растянутого стыка деревянной фермы с применением двусторонних накладок на нагелях (пример 5.3 [4]) по ТКП EN 1995-1-1-2009 и ТКП 45-5.05-146-2009 показали, что расчетное значение несущей способности для одного среза нагеля в симметричном двухсрезном соединении¹⁴ в 1,26 раза выше соответственно, что позволяет уменьшить расход металла на крепежные изделия и древесины на накладки.

⁸ Деревянные конструкции. Строительные правила Республики Беларусь : СП 5.05.01-2021. – Введ. 01.06.21. – Минск : Минстройархитектуры, 2021. – 115 с.

⁹ См. сноску 8, таблица 5.4.

¹⁰ См. сноску 8, таблица 9.1.

¹¹ См. сноску 8, таблица 5.6.

¹² См. сноску 8, таблица 6.2.

¹³ См. сноску 8.

¹⁴ Жук, В.В. О методике расчета деревянных элементов на цилиндрических нагелях с учетом норм проектирования Еврокод 5 / В.В. Жук // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского Союза в области строительства : материалы Междунар. науч.-метод. семинара, Минск, 29 мая 2012 г. : в 2 ч. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В.Ф. Зверев [и др.]. – Минск, 2012. – Ч. 1. – С. 49–58.

Отметим, что в выражении (2) второе слагаемое $F_{ax,Rk}/4$, учитывающее эффект нити, согласно ТКП EN 1995-1-1-2009, ограничивалось по величине в процентном отношении от несущей способности по теории пластичности Джохансена – для болтов 25%. Более того, согласно¹⁵, расчет нагельных соединений древесины с древесиной можно было вести без учета эффекта нити при условии, что характеристическое значение несущей способности нагеля при выдергивании $F_{ax,Rk}$ не определено. Данные положения не были включены в СП 5.05.01-2021.

Методика расчета симметричных двухсрезных соединений на нагелях по зарубежным нормам. В последнем нормативном документе по проектированию деревянных конструкций в Украине ДБН В.2.6-161:2017¹⁶, который фактически содержит положения нормативных документов ТКП EN 1995-1-1-2009 и СП 5.05.01-2021, формулы для расчета значения несущей способности $F_{v,Rk}$ для одного среза нагеля аналогичны формулам (1) и (2).

Расчетное значение несущей способности R_d для одного среза нагеля в двухсрезном соединении деревянных элементов по польским нормам PN-B-03150:2000¹⁷ определяют по формулам:

$$R_d = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,d} \cdot t_1 \cdot d, \\ 0,5 f_{h,1,d} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta, \\ 1,1 \frac{f_{h,1,d} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,d}}{f_{h,1,d} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right], \\ 1,1 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,d} \cdot f_{h,1,d} \cdot d}, \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (a) \\ (б) \\ (в) \quad (3) \\ (г) \end{array}$$

где $f_{h,i,d}$ – расчетное значение сопротивления древесины i -го элемента соединения вдавливанию нагеля плашмя по направлению волокон и определяемое по формуле: $f_{h,i,d} = k_{mod,i} \cdot f_{h,i,k} / \gamma_M$;

здесь $k_{mod,i}$ – коэффициент модификации¹⁸;

$f_{h,i,k}$ – характеристическое значение сопротивления древесины i -го элемента сопротивления вдавливанию нагеля плашмя по направлению волокон;

γ_M – частный коэффициент свойств материалов¹⁹;

t_1 – толщина крайнего элемента;

t_2 – толщина среднего элемента;

d – диаметр нагеля;

β – коэффициент, определяемый по формуле: $\beta = f_{h,2,d} / f_{h,1,d}$;

$M_{y,d}$ – расчетное значение момента, вызывающего образование пластического шарнира в поперечном сечении нагеля, определяемое по формуле: $M_{y,d} = M_{y,Rk} / \gamma_M$;

здесь $M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6}$ – характеристическое значение момента, вызывающего образование пластического шарнира в поперечном сечении нагеля;

$f_{u,k}$ – характеристическое значение прочности материала нагеля при его растяжении.

Анализ нормативно-технической литературы, изданной в Чехии, показывает, что при расчете соединений древесины на нагелях используется методика как Еврокода 5 [5], так и немецких норм DIN 1052:2004 [6]. При определении расчетного значения несущей способности для одного среза нагеля в соединении [5] используют формулу:

$$R = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_y \cdot f_{h,1} \cdot d}, \quad (4)$$

где $M_y = M_{y,k} / \gamma_M$, $f_{h,1} = f_{h,k} \cdot k_{mod} / \gamma_M$.

В Китае [7] при расчете соединений деревянных элементов на нагелях используют положения Еврокода 5 – формулы (3).

Литовские нормы STR 2.05.07:2005²⁰ включают положения Еврокода 5 в части общих указаний по проектированию деревянных конструкций, механических свойств древесины и плитных материалов на ее основе. Остальные положения по проектированию, в том числе и соединений деревянных элементов на нагелях, фактически повторяют СНиП II-25-80 и СП 64.13330.2011²¹.

Сравнительный анализ отечественных и зарубежных норм. Нормы по проектированию деревянных конструкций, действующие в Республике Беларусь и в странах ближнего и дальнего зарубежья, за исключением литовских норм приведены в соответствии с нормами Европейского Союза. На основе научных исследований и опыта

¹⁵ См. сноску 5, п. 8.2.2.

¹⁶ Дерев'яні конструкції. Конструкції будинків і споруд : ДБН В.2.6-161:2017. – Введ. 01.02.18. – Київ : М-во регіонального розвитку, буд-ва та житлово-комунального господарства України, 2017. – 111 с.

¹⁷ Konstrukcje drewniane – Obliczenia statyczne i projektowanie : PN-B-03150-2000. – 47 s.

¹⁸ См. сноску 17, таблица 3.2.5.

¹⁹ См. сноску 17, таблица 3.2.2.

²⁰ Medinių konstrukcijų projektavimas : STR 2.05.07:2005. – 2005 m. vasario 10 d. – Vilnius : Lietuvos Respublikos aplinkos ministro, 2005. – 48 p.

²¹ Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 : СП 64.13330.2011. – Введ. 05.20.10. – М. : Минрегион России, 2010. – 86 с.

строительства, в процессе внедрения Еврокода 5, были разработаны национальные приложения, которые отличаются от положений по проектированию, рекомендуемых Еврокодом. Так, только в нормы Беларуси и Украины при расчете соединений деревянных элементов на нагелях включено второе слагаемое $F_{ax,Rk}/4$ (формулы (2)), учитывающее эффект нити.

Наблюдается разный подход к назначению величины частного коэффициента свойств материала соединений γ_M . В нормах Беларуси, Украины и Литвы этот коэффициент принят равным 1,3, в Польше, Чехии и Китае – 1,1. Кроме того, в нормах Беларуси, Украины, Китая и Литвы приняты разные величины γ_M : для пиломатериалов – 1,3; для клееной древесины – 1,25; LVL, фанеры, ОСП – 1,2. В Польше и Чехии вышеперечисленные материалы объединены в одну группу, для которой принят коэффициент $\gamma_M=1,3$.

Отметим разный подход и к назначению диаметра отверстий в элементах соединений из древесины под цилиндрические нагели (таблица 1).

Таблица 1. – Рекомендуемый сортамент метизов и диаметр отверстий

Показатель \ Страна	Беларусь, Россия	Украина	Польша	Чехия	Литва
Диаметр метизов, мм	8-24	6-24	не менее 10	не менее 6	12-24
Рекомендуемый диаметр, мм	d_n	d_n+1 мм ¹⁾ $d_n+0,1$ мм ²⁾	$0,97d_n$	$d_n+0,1$ мм	d_n

Примечание. d_n – диаметр цилиндрического стержня или болта; ¹⁾ – для болтов; ²⁾ – для стержней.

Специалисты из лаборатории лесных продуктов США²² утверждают, что на несущую способность и деформативность нагельных соединений влияет качество стенок отверстий в деревянных элементах: скорость подачи сверла и скорость его вращения должны быть такими, чтобы сверло резало, а не разрывало волокна.

Заслуживают внимания справочные материалы к нормам Украины, в которых приведены классы стали для нагелей и классы прочности для болтов, а также соответствующие им величины характеристических значений прочности материала на растяжение.

Сравнение результатов расчета по разным нормам. В качестве примера расчета на цилиндрических нагелях рассмотрим расчет растянутого стыка деревянной фермы с применением двухсторонних деревянных накладок (рисунк 1). Исходные данные для расчета приняты по данным примера 5.3 [4]. Результаты расчета по нормам Республики Беларусь, Украины, Польши, Чехии, Китая и Литвы представлены в таблице 2.

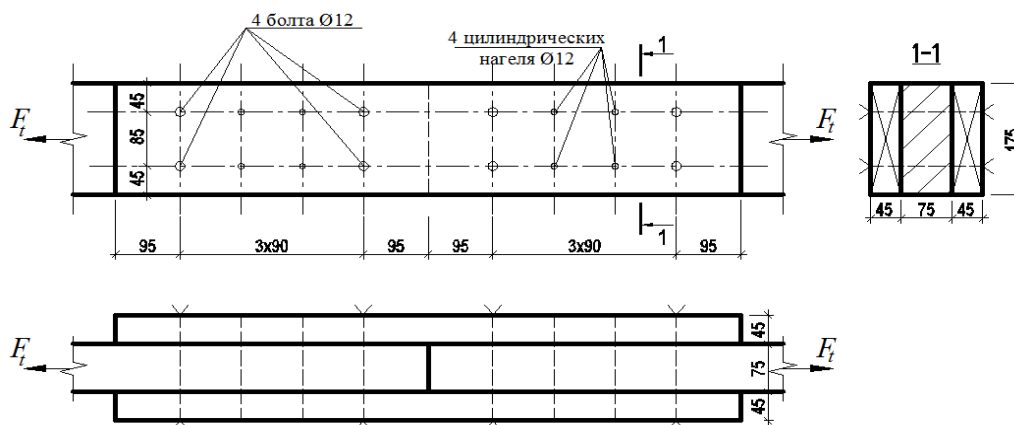


Рисунок 1. – Растянутый стык деревянной фермы [4]

Таблица 2. – Результаты расчета стыка нижнего пояса фермы

Нормативный документ	Значение несущей способности для одного среза нагеля, Н	Число нагелей, n_{ef}
1	2	3
PN-B-03150:2000, 木结构 [7]	$R_d = 1,1 \frac{f_{h,1,d} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,d}}{f_{h,1,d} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] =$ $= 1,1 \frac{13,71 \cdot 45 \cdot 12}{2 + 1} \left[\sqrt{2 \cdot 1(1+1) + \frac{4 \cdot 1(1+2 \cdot 1) \cdot 49218}{13,71 \cdot 12 \cdot 45^2}} - 1 \right] = 3808$ $R_d = 1,1 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,d} \cdot f_{h,1,d} \cdot d} = 1,1 \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1+1}} \sqrt{2 \cdot 49218 \cdot 13,71 \cdot 12} = 4427$	$\frac{12,8}{16}$

²² Справочное руководство по древесине / Лаборатория лесных продуктов США ; пер. с англ. Я. П. Горелика и Т.В. Михайловой ; под ред. С.Н. Горшина [и др.]. – М. : Лесн. пром-ст, 1979. – 544 с.

Окончание таблицы 2

1	2	3
ČSN 73 1702:2007 ²³	$R_k = \sqrt{2M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} = \sqrt{2 \cdot 54140 \cdot 27,42 \cdot 12} = 5969$ $R_d = \frac{k_{mod} \cdot R_k}{\gamma_M} = \frac{0,55 \cdot 5969}{1,1} = 2985$	$\frac{16,3}{20}$
СП 5.05.01-2021, ДБН В.2.6-161:2017	$F_{v,Rk} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} =$ $= 1,05 \frac{27,42 \cdot 45 \cdot 12}{2 + 1} \left[\sqrt{2 \cdot 1 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 54140}{27,42 \cdot 12 \cdot 45^2}} - 1 \right] + \frac{1561}{4} = 6764$ $F_{v,Rd} = \frac{0,55 \cdot 6764}{1,3} = 2862$ $F_{v,Rk} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 1,15 \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \sqrt{2 \cdot 54140 \cdot 27,42 \cdot 12} + \frac{1561}{4} = 7254$ $F_{v,Rd} = \frac{0,55 \cdot 7254}{1,3} = 3000$	$\frac{17}{20}$
STR 2.05.07:2005	$R_{j,d} = (1,8d^2 + 0,02t_1^2) \sqrt{k} = (1,8 \cdot 1,2^2 + 0,02 \cdot 4,5^2) \sqrt{0,85 \cdot 10^3} = 2763$ $R_{j,d} = 2,5d^2 \sqrt{k} = 2,5 \cdot 1,2^2 \sqrt{0,85 \cdot 10^3} = 3312$	$\frac{17,57}{20}$

Примечание.

1. В приведенных выражениях сохранены обозначения соответствующих нормативных документов.
2. $F_{ax,Rk}$ – характеристическое значение несущей способности цилиндрического стержня при выдергивании из элемента соединения определено в соответствии с правилами 9.4²⁴ для гладких гвоздей.
3. $k=0,85$ – коэффициент, учитывающий класс эксплуатации 3²⁵.
4. В числителе приведено расчетное число нагелей, в знаменателе – принятое число нагелей.
5. Выделено минимальное значение несущей способности для одного среза нагеля.

Анализ результатов расчета соединений древесины на цилиндрических нагелях показывает, что величина второго слагаемого $F_{ax,Rk}/4$, учитывающего эффект нити, в процентном отношении от несущей способности по теории пластичности Джохансена составляет 6%, что меньше величины 25%²⁶. Очевидно, что второе слагаемое $F_{ax,Rk}/4$, в запас прочности можно исключить из выражений (2). Тем более, что при конструировании стыка часть цилиндрических нагелей (в пределах 25–40%) необходимо заменить стяжными болтами с круглыми или квадратными шайбами.

Закключение. По результатам сравнительного анализа методики расчета соединений деревянных элементов на нагелях по отечественным и зарубежным нормам можно сделать следующие выводы:

1. Отечественные и зарубежные нормы, гармонизированные с Еврокодом 5, учитывают большее число параметров соединений деревянных элементов на нагелях, влияющих на величину расчетного значения несущей способности для одного среза нагеля.
2. Введение национальных приложений (со значениями параметров, установленных национальными органами стандартизации), отличающихся от положений Еврокода 5²⁷, влияет на результаты расчета соединений деревянных элементов на нагелях – расхождение результатов расчета, например, по польским нормам PN-B-03150-2000 и СП 5.05.01-2021 составляет 27,5%.
3. Учитывая, что отечественные нормы по проектированию деревянных конструкций, гармонизированные с Еврокодом 5, создают предпосылки для использования мировых достижений строительной науки и дают шанс для качественных изменений в строительстве, необходимо ускорить работы по обеспечению проектировщиков нормативно-методической литературой, переработать учебники и пособия для расчета конструкций из древесины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Найчук, А.Я. Ограждающие конструкции покрытий зданий из древесины и плитных материалов на ее основе / А.Я. Найчук, И.Ф. Захаркевич ; под ред. А.Я. Найчука, И.Ф. Захаркевича. – Брест : БрГТУ, 2021. – 67 с.
2. Найчук, А.Я. Арки из древесины и материалов на ее основе / А.Я. Найчук, И.Ф. Захаркевич, А.Б. Шурина ; под ред. А.Я. Найчука, И.Ф. Захаркевича, А.Б. Шурина. – Брест : БрГТУ, 2022. – 68 с.

²³ Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí, Obecná pravidla pro pozemní stavby : ČSN 73 1702:2007. – Zav.11.2007. – Praha : Český normalizační institut, 2007. – 173 s.

²⁴ См. сноску 8.

²⁵ См. сноску 20, п. 8.8.2.

²⁶ См. сноску 5.

²⁷ См. сноску 6.

3. Найчук, А.Я. Рамы из древесины и материалов на ее основе / А.Я. Найчук, И.Ф. Захаркевич, А.Б. Шурин ; под ред. А.Я. Найчука, И.Ф. Захаркевича, А.Б. Шурина. – Брест : БрГТУ, 2022. – 68 с.
4. Kotwica, J. Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym / J. Kotwica. – Warszawa : Arkady, 2004. – 357 s.
5. Krämer, V. Dřevěné konstrukce. Příklady a řešení podle ČSN 73 1702. Modifikovaný překlad 2. Vydání publikace Für den Holsbau-Aufgaben und Lösungen nach DIN 1052 / V. Krämer. – Praha : ČKAIT, 2009. – 316 s.
6. Blass, H.J. Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí. Obecha pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Komentář k ČSN 73 1702:2007. Modifikovaný překlad vesvětlivek k německé normě DIN 1052:2004 / H.J. Blass, J. Ehlbeck, H. Kreuzinger, G. Steck. – Praha : ČKAIT, 2008. – 226 s.
7. 成茂王永伟, 木结构 / 成茂王永伟 ; 安景龙主编. – 2009. – 229 s.

REFERENCES

1. Naichuk, A.Y. & Zakharkevich, I.F. (2021). *Ograzhdayushchie konstruksii pokrytii zdanii iz drevesiny i plitnykh materialov na ee osnove*. Brest: BrGTU. (In Russ.).
2. Naichuk, A.Y., Zakharkevich, I.F., & Shurin, A.B. (2022). *Arki iz drevesiny i materialov na ee osnove*. Brest: BrGTU. (In Russ.).
3. Naichuk, A.Y., Zakharkevich, I.F., & Shurin, A.B. (2022). *Ramy iz drevesiny i materialov na ee osnove*. Brest: BrGTU. (In Russ.).
4. Kotvitsa, J. (2004). *Wooden structures in traditional construction*. Warsaw: Arkady. (In Polish).
5. Kramer, V. (2009). *Wooden structures. Examples and solutions according to ČSN 73 1702. Modified translation 2. Issue of the publication Für den Holsbau-Aufgaben und Lösungen Nach DIN 1052*. Prague: ČKAIT. (In Czech).
6. Blass, H., Ehlbeck, J., Kreuzinger, H., & Steck., G. (2008). *Design, Calculation and assessment of wooden building structures. Obecha rules and rules for land construction. Commentary to ČSN 73 1702:2007. Modified translation of the German standard DIN 1052:2004*. Prague: ČKAIT. (In Czech).
7. Chengmao Wang Yongwei (2009). *Wooden Structure*. Tokyo: Chengmao Wang Yunwei. (In Chinese).

Поступила 12.10.2022

**COMPARATIVE ANALYSIS OF DOMESTIC AND FOREIGN STANDARDS
FOR THE CALCULATION OF JOINTS OF WOODEN ELEMENTS OF THE NAGEL TYPE**

V. ZHYK, E. MATWEENKO
(Brest State Technical University)

The article presents the chronology of the development of regulatory documentation for the calculation and design of wooden structures in the Republic of Belarus. The analysis of the methodology for calculating symmetrical double-cut joints of wooden elements on metal nagels according to the construction rules of SP 5.05.01-2021 and the norms of foreign countries that have harmonized building codes with the Eurocode 5 standard, taking into account national applications. The differences in the provisions for the calculation of compounds on metal nagels in terms of assigning the value of the partial coefficient of the properties of the compound materials are revealed. A different approach to the assignment of technological parameters in the manufacture of building structures using metal nagels is noted. A comparative calculation of the joint of the lower belt of the truss with double-sided wooden plates on bolts is performed. The calculation results were evaluated according to the construction standards of the Republic of Belarus, China, Poland, Ukraine and Lithuania. It is established that the introduction of national applications established by national standardization bodies affects the results of the calculation of the joints of wooden elements on the nagels.

Keywords: design standards, wooden structures, connection, metal, rod, bolt, bearing capacity.

УДК 624.072

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-22-28

УЧЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ОРТОТРОПНЫХ ПЛИТ В СТАТИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ БЕСКОНЕЧНОЙ РЕГУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ ПЛИТ НА УПРУГОМ СЛОЕ

канд. техн. наук, доц. **О.В. КОЗУНОВА, К.А. СИРОШ**
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

Рассматривается бесконечная регулярная система ортотропных плит на упругом слое, жестко соединенном с недеформируемым основанием. Нелинейный расчет бесконечной регулярной системы плит на изотропном основании выполняется вариационно-разностным методом (ВРМ), для которого характерна замена дифференциальных уравнений конечно-разностными аппроксимациями. Численное решение полученной системы уравнений выполнено с применением итерационного алгоритма.

При нахождении переменной жесткости плиты на упругом слое используется зависимость «жесткость – кривизна» по Соломину в направлениях осей инерции. По найденным цилиндрическим жесткостям изгиба из соотношения С.П. Тимошенко определяется жесткость кручения плиты для каждой итерации. Энергия деформации упругого основания заменяется работой реактивных давлений в контактной зоне конструкции на основании закона сохранения энергии.

Анализ результатов упругого и нелинейного расчетов (3-я итерация) проводился для значений осадок ортотропной плиты и контактных напряжений в зоне взаимодействия плиты с упругим основанием.

Ключевые слова: бесконечная регулярная система плит, ортотропная плита, вариационно-разностный метод, упругий слой, контактная зона, прогибы плиты, осадки основания, контактные напряжения, внутренние усилия, физическая нелинейность.

Введение. Задачи контактного взаимодействия изгибаемых конструкций с упругим основанием в теории упругости [1] и строительной механике [2] активно изучаются, что отражено в трудах современных белорусских ученых, таких как: С.В. Босаков, С.Д. Семенюк, О.В. Козунова, К.В. Дмитриева (Юркова) и др. [3–9]. В работах данных ученых при решении задач контактного взаимодействия учитываются усложняющие параметры контактирующих тел: неоднородность (слоистость) упругого основания, физическая нелинейность основания, ползучесть бетона, конструктивная нелинейность железобетонных элементов и другие.

Вопрос применения вариационных методов для решения контактных задач теории упругости ввиду сложности решения таких задач (особенно для изгибаемых конструкций) в научной литературе еще недостаточно исследован. Также до настоящего времени не исследован в полной мере вопрос расчета регулярных систем железобетонных плит на упругом основании с учетом анизотропии, ортотропии и трещинообразования в силу значительной математической сложности постановок и алгоритмов решаемых задач. В работах М.И. Горбунова-Посадова [10], С.Д. Семенюка [11], С.Н. Клепикова [12], С.В. Босакова [5] различными подходами проводились исследования по расчету фундаментных изотропных плит и пространственных монолитных фундаментов как систем перекрестных лент на упругом основании.

Постановка задачи. В данной работе авторами рассматривается бесконечная регулярная система плит под действием внешней нагрузки, опирающаяся на упругое основание. Система разбивается в силу симметрии на соединенные между собой базовые фрагменты – прямоугольные гибкие ортотропные плиты (рисунок 1).

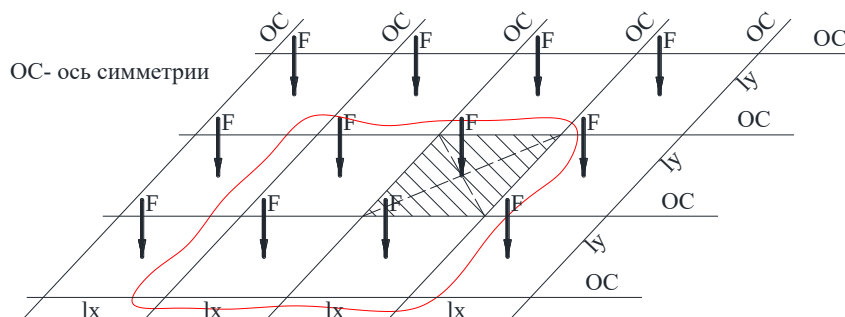


Рисунок 1. – Бесконечная регулярная система ортотропных плит под действием симметричной нагрузки

Геометрические размеры конструкций – l_x , l_y . Высота поперечного сечения плит h постоянна по всей площади плиты. Внешняя нагрузка F действует в центре плиты перпендикулярно и симметрично плоскости осей конструкции. Основание в задаче предлагается моделировать упругим ограниченным по толщине однородным слоем, соединенным с несжимаемым основанием.

Алгоритм расчета бесконечной регулярной системы железобетонных плит. Из бесконечной регулярной системы плит вычленяется расчетный элемент – ортотропная плита.

Ортотропная плита разбивается на равные участки размерами $\Delta x \times \Delta y$. В результате получено 20 ячеек и 30 узловых точек. Упругое основание заменяется расчетной областью (решается пространственная задача). Основание аппроксимируется симметричной объемной разбивочной сеткой с постоянным шагом по осям глобальной системы координат – получено 80 ячеек и 150 узловых точек (рисунок 2).

Размер граней объемной ячейки расчетной области основания соответствует шагу разбивочной сетки Δx , Δy , Δz [13]. Ячейка имеет форму параллелепипеда.

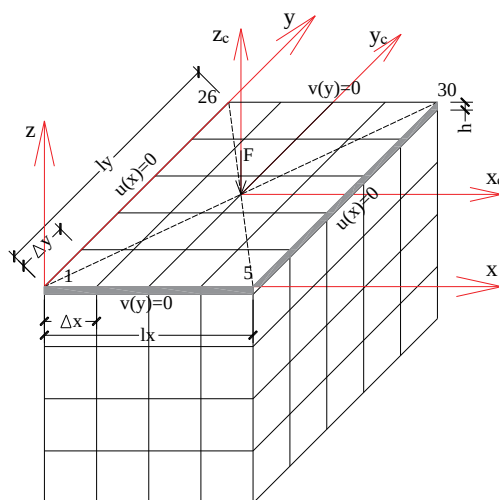


Рисунок 2. – Расчетная область, соответствующая одной ортотропной плите

Граничные условия. В задаче для расчетной области основания заданы *кинематические граничные условия*: на границах – горизонтальные перемещения $u(x)=0$, $v(y)=0$; в зоне контакта – осадки основания и прогиб плиты одинаковы.

Смешанные граничные условия выполняются в крайних точках ортотропных плит регулярной системы¹:

$$Q_z \Big|_{x=\pm \frac{l_x}{2}} = -D_x \frac{d^3 w}{dx^3} = 0; \quad Q_z \Big|_{y=\pm \frac{l_y}{2}} = -D_y \frac{d^3 w}{dy^3} = 0; \quad (1)$$

$$\varphi_x \Big|_{y=\pm \frac{l_y}{2}} = \frac{dw}{dy} = 0; \quad \varphi_y \Big|_{x=\pm \frac{l_x}{2}} = \frac{dw}{dx} = 0.$$

В соответствии с вариационным принципом Лагранжа [1] полная потенциальная энергия в состоянии равновесия принимает свое наименьшее значение при нахождении плиты под статической нагрузкой. Полная потенциальная энергия конструкции $\mathcal{E}$ складывается из: энергии деформации конструкции Ω , энергии деформации упругого основания U , работы внешней нагрузки Π :

$$\mathcal{E} = \Omega + U + \Pi. \quad (2)$$

При замене интегро-дифференциальных выражений функционалов энергий на конечно-разностные аппроксимации становится возможным преобразовать систему дифференциальных уравнений в систему линейных алгебраических уравнений. Ниже в общем виде представлена СЛАУ [13; 14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial v_i} = 0, \\ \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial u_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N, \\ \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial w_i} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

где N – число узловых точек параллелепипеда.

Решение системы (3) позволяет получить значения неизвестных компонентов вектора перемещений $u_i(x,y,z)$, $v_i(x,y,z)$, $w_i(x,y,z)$.

¹ Козунова, О.В. Нелинейный расчет бесконечной регулярной системы плит на изотропном основании / О.В. Козунова, К.А. Сирош // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : Материалы XXVIII Междунар. симпозиума им. А.Г. Горшкова, Кремлёнки, 16–20 мая 2022 г. – М., 2022. – С. 113–115.

Определение составляющих потенциальной энергии системы. Плоскостью изгиба принята срединная плоскость недеформированной плиты в осях XU . В центр тяжести плиты помещено начало координат – точка O . Одна из главных осей – ось Z , направлена в сторону ненагруженной поверхности плиты ввиду симметрии решаемой задачи. Объемными силами пренебрегаем [15].

Для ортотропной плиты используем уравнения обобщенного закона Гука (в виде (2.7), (2.8) из [16]).

Принято, что энергия деформации конструкции тождественна энергии изгиба конструкции (деформации сдвига не учитываются). Выражение потенциальной энергии деформаций ортотропной плиты по Лехницкому [16] учитывает кручение ортотропной плиты в плоскости XOY :

$$\Omega = V = \frac{1}{2} \iint \left[D_x \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + 2D_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_y \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 4D_k \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy, \quad (4)$$

где D_x, D_y – цилиндрические жесткости изгиба ортотропной плиты по направлениям осей Y и X соответственно (оси совпадают с главными осями инерции);

$D_k (D_{xy})$ – жесткость кручения плиты.

Цилиндрические жесткости изгиба ортотропной плиты [16] по направлениям осей Y и X соответственно:

$$D_x = \frac{E_x h^3}{12(1-\nu_x \nu_y)}; \quad D_y = \frac{E_y h^3}{12(1-\nu_x \nu_y)}, \quad (5)$$

где E_x, E_y – главные модули упругости;

ν_x, ν_y – коэффициенты Пуассона материала плиты.

Для учета в расчетах жесткости кручения плиты применена формула из монографии С.П. Тимошенко [17]:

$$D_k = D_{xy} = \frac{\nu_x + \nu_y}{2} \sqrt{D_x \cdot D_y}, \quad (6)$$

где D_x, D_y – цилиндрические жесткости, определяются по формулам (5).

При определении изгибающих и крутящего моментов ортотропной изолированной плиты использованы соотношения [15]:

$$\begin{aligned} M_x &= -D_x \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right); \\ M_y &= -D_y \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right); \\ M_k &= -2D_k \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \quad (7)$$

Энергия деформации упругого основания заменяется работой реактивных давлений в контактной зоне конструкции на основании закона сохранения энергии [17]. Если пренебречь реактивными касательными усилиями в контактной зоне, тогда энергия деформации упругого основания для плиты определяется [7] как:

$$U = \frac{1}{2} \iint_S p(x, y) w(x, y) dx dy; \quad (8)$$

где $p(x, y)$ – реактивные давления в контактной зоне конструкции.

Работа внешней нагрузки $q(x, y)$ для прямоугольной плиты определяется по формуле [7]:

$$\Pi = - \iint_S q(x, y) w(x, y) dx dy. \quad (9)$$

В формулах (8) и (9) интегрирование производится по области контакта упругого основания и плиты.

Учет физической нелинейности. Технические нормативные правовые акты в статических расчетах железобетонных гибких плит с возможным трещинообразованием при нахождении переменных жесткостей рекомендуют использовать приведенный модуль упругости. В статье [18] приводится подробный алгоритм такого расчета. В данной работе предлагается нелинейный расчет основывать на зависимости «жесткость – кривизна» по В.И. Соломину [19], которая связана с диаграммой «момент – кривизна» через переменную (секущую) жесткость:

$$\operatorname{tg} \beta_i = B_i = \frac{M_k}{\chi_k}, \quad (10)$$

где B_i – переменная (секущая) жесткость при изгибе плиты в i -ом состоянии, которая является тангенсом угла наклона секущей к оси кривизны, проведенной к точке K диаграммы «момент – кривизна».

Зависимость «жесткость – кривизна» ранее построена одним из авторов [20]. При построении использовалась приведенная цилиндрическая жесткость плиты по направлению осей ортотропии. Зависимость «жесткость – кривизна» построена на рисунке 3.

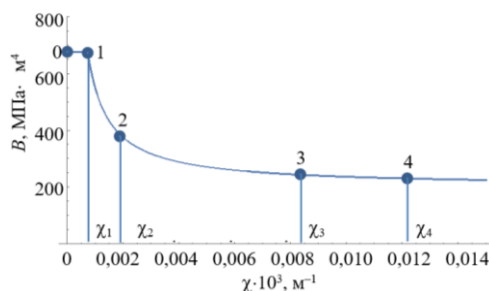


Рисунок 3. – Зависимость «жесткость – кривизна» [20]

Результаты расчета. Расчет выполнялся для изолированной железобетонной плиты (геометрические размеры $4 \times 3 \times 0,14$ м). Материал конструкции – тяжелый бетон класса C20/25. Принятые в задаче упругие характеристики: модуль деформации бетона $E_b = 29,05$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_b = 0,17$. Толщина слоя, на котором расположена плита, $H = 7$ м. Слой упругий и жестко соединен с недеформируемым основанием. Упругие параметры слоя: модуль упругости $E_0 = 20$ кПа, коэффициент Пуассона $\nu_0 = 0,33$. На плиту действует внешняя статическая нагрузка от колеса $Q = 65$ кН. Нагрузка приложена в центре плиты и принимается распределенной на участке размером $0,4 \times 0,4$ м. В расчете был учтен собственный вес плиты $q = 3,5$ кН/м² [20].

Зависимость «жесткость – кривизна» аппроксимируется легче зависимости «момент – кривизна». К тому же зависимость «жесткость – кривизна» сокращает объем вычислений, что отражено в работе [15].

Для определения показателя гибкости изолированной железобетонной плиты конечных размеров $a \times b$ для дальнейшего анализа параметров НДС, воспользуемся формулой из монографии Горбунова-Посадова [10]:

$$\beta = \frac{\pi E_0 a^3}{(1 - \nu_0^2) E J_b}, \quad (11)$$

где E_0, ν_0 – упругие параметры упругого слоя;

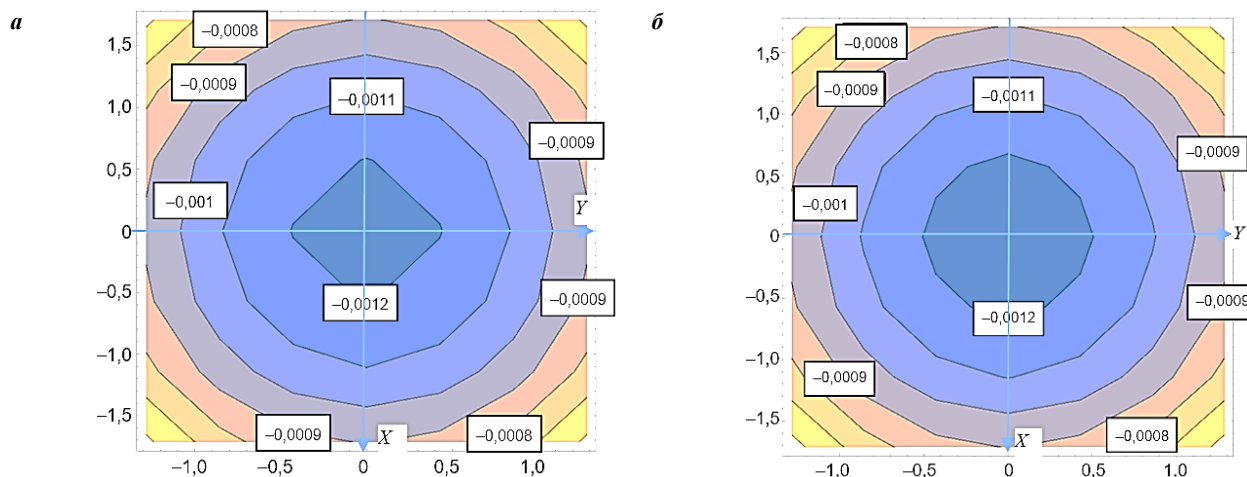
$E J_b$ – цилиндрическая жесткость железобетонной плиты.

Получаем значение показателя гибкости после подстановки параметров плиты и упругого основания в (11):

$$\beta = \frac{3,14 \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 1,5^3}{(1 - 0,33^2) \cdot 6840,46 \cdot 10^3} = 34,789.$$

Результаты расчета показали, что в месте приложения внешней сосредоточенной силы (в центре тяжести плиты) имеют место максимальные значения. Упругий расчет: осадка основания $w_{\max} = 0,0012558$ м; контактное напряжение в зоне взаимодействия плиты с упругим слоем $p_{\max} = 10,38$ кПа. Результаты нелинейного расчета (3-я итерация): осадка основания $w_{\max} = 0,0012582$ м; контактное напряжение в зоне взаимодействия плиты с упругим основанием $p_{\max} = 10,43$ кПа [20].

Ниже на рисунках 4–5 графически представлены результаты расчета деформирования ортотропных плит по предложенной методике.



а – результаты упругого расчета; б – результаты нелинейного расчета (3-я итерация)

Рисунок 4. – Осадки железобетонной плиты, м

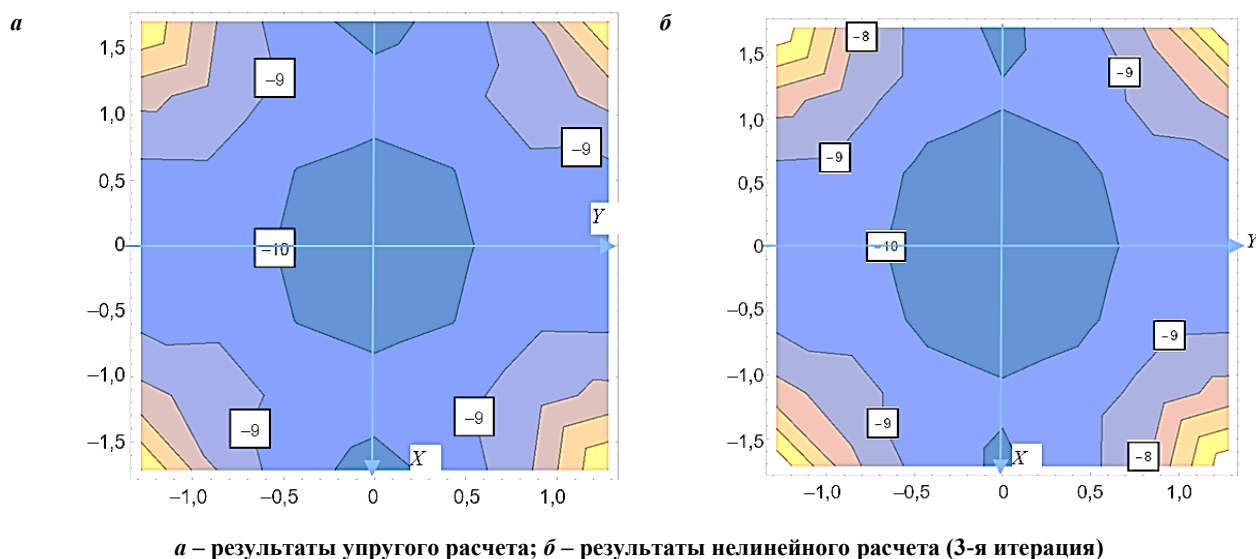


Рисунок 5. – Эпюры контактных напряжений, кПа

Сопоставление результатов упругого и нелинейного решения (3-я итерация). Сопоставление результатов решений графически представлено на рисунке 6. Анализ проводился на основании величин осадок ортотропной плиты и контактных напряжений в зоне контактного взаимодействия плиты и упругого основания.

На первом графике можно наблюдать практически полное совпадение значений осадок, полученных в результате упругого и нелинейного решения, при малом их увеличении. Второй график отражает графическое сравнение величин контактных напряжений упругого и нелинейного расчета в зоне контактного взаимодействия. Вблизи центра плиты результаты решений практически полностью совпадают, по направлению к краям плиты наблюдается незначительное расхождение в значениях напряжений (при учете переменной кривизны и жесткости) – до 3%.

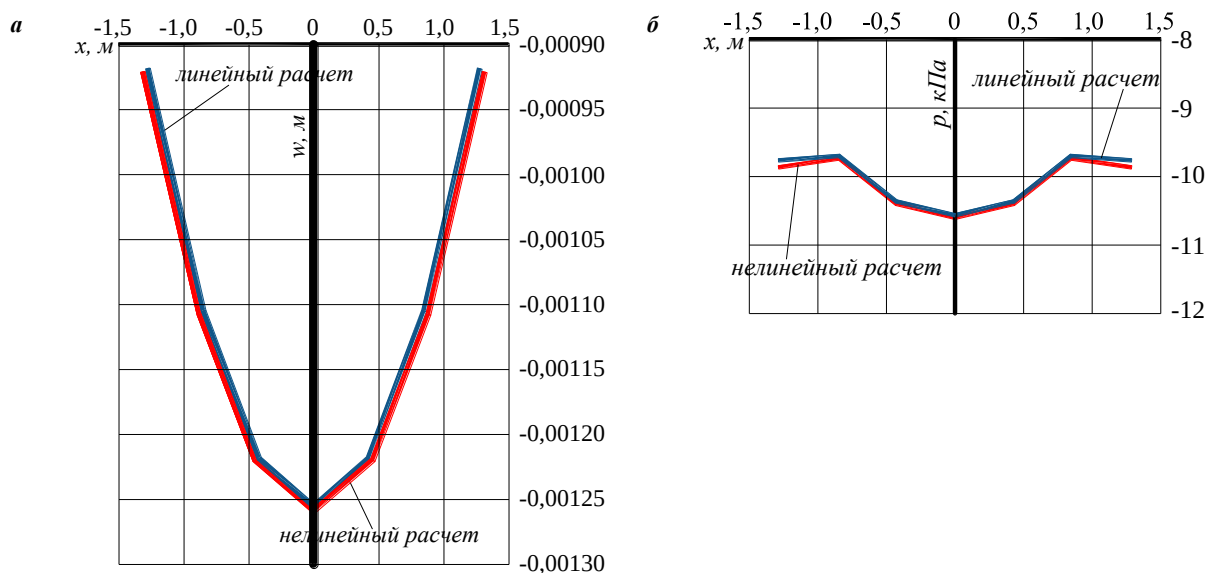


Рисунок 6. – Графическое сопоставление результатов упругого и нелинейного решения (3-я итерация)

Закключение. Вариационно-разностный метод использован в работе для исследования параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) изолированных плит на упругом основании. Плиты рассматривались как элемент регулярной бесконечной системы железобетонных плит, расположенных на упругом слое с ограничением глубины сжимаемой толщи.

Стоит отметить, для вычисления осадок плиты, а также при необходимости определения контактных напряжений (реактивных давлений под плитой) вблизи места приложения силы достаточно использовать упругую модель. Для нахождения реактивных давлений при удалении от места приложения внешней силы (вблизи границ плиты) целесообразно применение нелинейной модели.

Методика расчета предлагаемой изолированной плиты лежит в основе методики расчета регулярной системы плит. В дальнейшем в предложенном алгоритме для исходных данных регулярной системы плит будет введена диаграмма «жесткость – кривизна», аналогично данному примеру. Полученные результаты будут являться обобщением теории статических расчетов плит методами строительной механики.

НДС железобетонной плиты и контактной зоны под плитой определяется в совокупности для бесконечной регулярной системы. При работе изолированной плиты, и особенно с трещинами, необходимо учитывать нелинейные свойства материала (в данном случае железобетона) в каждом направлении через переменную кривизну плиты. Данная область исследований нелинейных задач требует особого внимания и дальнейшей разработки для создания универсальной методики решения подобных задач.

Исследования реализовывались в компьютерной программе Mathematica.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М. : Высш. шк., 1990. – 400 с.
2. Ржаницын, Р.А. Строительная механика / Р.А. Ржаницын. – М., Высш. шк., 1991. – 439 с.
3. Босаков, С.В. Расчет системы перекрестных балок на двухслойном основании / С.В. Босаков, Я.Д. Семенюк // Вестн. БГТУ. Сер. Стр-во и архитектура. – 2000. – № 1. – С. 14–16.
4. Босаков, С.В. Расчет железобетонных пространственных фундаментов, как системы перекрестных балок, на упругом основании с учетом ползучести бетона / С.В. Босаков, С.Д. Семенюк // Вестн. БГТУ. Сер. Стр-во и архитектура. – 2001. – № 1. – С. 13–16.
5. Босаков, С.В. Статические расчеты плит на упругом основании / С.В. Босаков. – Минск : БНТУ, 2002. – 127 с.
6. Семенюк, С.Д. Железобетонные и пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформированном основании / С.Д. Семенюк. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2003. – 269 с.
7. Босаков, С.В. Метод Ритца в контактных задачах теории упругости : моногр. / С.В. Босаков. – Брест : БрГТУ, 2006. – 107 с.
8. Босаков, С.В. Вариационно-разностный подход в решении контактной задачи для нелинейно упругого неоднородного основания. Плоская деформация. Теория расчета (Часть 1) / С.В. Босаков, О.В. Козунова // Вестн. БНТУ. – 2009. – № 1. – С. 5–13.
9. Guenfoud, S. A Ritz's method based solution for the contact problem of a deformable rectangular plate on an elastic quarter-space / S. Guenfoud, S.V. Bosakov, D.F. Laefer // International Journal of Solids and Structures. – 2010. – Vol. 47, iss. 14–15. – P. 1822–1829.
10. Горбунов-Посадов, М.И. Расчет конструкций на упругом основании / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1984. – 680 с.
11. Семенюк, С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно-деформируемом основании / С.Д. Семенюк. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2003. – 269 с.
12. Клепиков, С.Н. Расчет конструкций на упругом основании / С.Н. Клепиков. – Киев : Будівельник, 1967. – 184 с.
13. Козунова, О.В. Расчет бесконечной системы перекрестных балок на упругом основании вариационно-разностным методом / О.В. Козунова, К.А. Сирош // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 65–71.
14. Козунова, О.В. Нелинейный расчет регулярной системы железобетонных балок на упругом основании при действии симметричной нагрузки / О.В. Козунова, К.А. Сирош // Механика. Исследования и инновации : междунар. сб. науч. тр. / БелГУТ. – Гомель, 2021. – С. 97–104.
15. Козунова, О.В. Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании. Часть 1. Теория расчета / О.В. Козунова // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 3. – С. 211–221. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-3-211-221.
16. Лехницкий, С.Г. Анизотропные пластинки / С.Г. Лехницкий. – М. : Гос. изд-во технико-теор. лит., 1957. – 387 с.
17. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М. : Фитматгиз, 1963. – 536 с.
18. Козунова, О.В. Нелинейный расчет железобетонной балки на упругом основании с помощью зависимости «жесткость-кривизна» / О.В. Козунова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2022. – № 1. – С. 37–46. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.1.37.46.
19. Соломин, В.И. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций / В.И. Соломин, С.Б. Шматов. – М. : Стройиздат, 1986. – 208 с.
20. Козунова, О.В. Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании. Часть 2. Результаты расчета / О.В. Козунова // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 4. – С. 290–296. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-4-290-296.

REFERENCES

1. Aleksandrov, A.V. & Potapov, V.D. (1990). *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
2. Rzhanytsyn, R.A. *Stroitel'naya mekhanika*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
3. Bosakov, S.V. & Semenyuk, Y.D. (2000). Raschet sistemy perekrestnykh balok na dvukhsloinom osnovanii. *Vestn. BGTU. Ser. Str-vo i arkhitektura*, (1), 14–16. (In Russ.). <https://rep.bstu.by/handle/data/5742>.
4. Bosakov, S.V. & Semenyuk, S.D. (2001). Raschet zhelezobetonnykh prostranstvennykh fundamentov, kak sistemy perekrestnykh balok, na uprugom osnovanii s uchetom polzuchesti betona. *Vestn. BGTU. Ser. Str-vo i arkhitektura*, (1), 13–16. (In Russ.). <https://rep.bstu.by/handle/data/15979>.
5. Bosakov, S.V. (2002). *Staticheskie raschety plit na uprugom osnovanii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
6. Semenyuk, S.D. (2003). *Zhelezobetonnye i prostranstvennye fundamenty zhilykh i grazhdanskikh zdaniy na neravnomerno deformirovannom osnovanii*. Mogilev: Belarus.-Ros. un-t. (In Russ.).
7. Bosakov, S.V. (2006). *Metod Rittsa v kontaktnykh zadachakh teorii uprugosti*. Brest: BrGTU. (In Russ.).
8. Bosakov, S.V. & Kozunova, O.V. (2009). Variatsionno-raznostnyi podkhod v reshenii kontaktnoi zadachi dlya nelineino uprugogo neodnorodnogo osnovaniya. Ploskaya deformatsiya. Teoriya rascheta (Chast' 1). *Vestn. BNTU*, (1), 5–13. (In Russ.). <https://rep.bntu.by/handle/data/2215>.
9. Guenfoud, S., Bosakov, S.V. & Laefer, D.F. (2010). A Ritz's method based solution for the contact problem of a deformable rectangular plate on an elastic quarter-space. *International Journal of Solids and Structures*, 47 (14–15), 1822–1829. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.03.014.

10. Gorbunov-Posadov, M.I., Malikova, T.A. & Solomin, V.I. (1984). *Raschet konstruksii na uprugom osnovanii*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
11. Semenyuk, S.D. (2003). *Zhelezobetonnye prostranstvennye fundamenty zhilykh i grazhdanskikh zdaniy na neravnomerno-deformiruemom osnovanii*. Mogilev: Belorus.-Ros. un-t. (In Russ.).
12. Klepikov, S.N. (1967). *Raschet konstruksii na uprugom osnovanii*. Kiev: Budivelnik. (In Russ.).
13. Kozunova, O.V. & Sirosh, K.A. (2021). Raschet beskonechnoi sistemy perekrestnykh balok na uprugom osnovanii variatsionno-raznostnym metodom [Calculation of an infinite system of cross beams on an elastic base by the variation-difference method]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Construction. Applied Sciences]*, (16), 65–71. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Kozunova, O.V. & Sirosh, K.A. (2021). Nelineinyi raschet regul'arnoi sistemy zhelezobetonnykh balok na uprugom osnovanii pri deistvii simmetrichnoi nagruzki [Nonlinear calculation of a regular system of reinforced concrete beams on an elastic base under a symmetrical load]. In *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii: mezhdunar. sb. nauch. tr. [Mechanics. Researches and Innovations]* (97–104). Gomel': BelGUT. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/6763/97-104.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
15. Kozunova, O.V. (2022). Sovershenstvovanie metodiki rascheta gibkikh ortotropnykh plit na uprugom osnovanii. Chast' 1. Teoriya rascheta [Improvement of Calculation Technique for Flexible Orthotropic Plates on Elastic Base. Part 1. Calculation Theory]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 21 (3), 211–221. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-3-211-221.
16. Lekhnitskii, S.G. (1957). *Anizotropnye plastinki*. Moscow: Gos. izd-vo tekhniko-teor. lit. (In Russ.).
17. Timoshenko, S.P. & Voynovsky-Kriger, S. (1963). *Plastiny i obolochki*. Moscow: Fizmatgiz. (In Russ.).
18. Kozunova, O.V. (2022). Nelineinyi raschet zhelezobetonnoi balki na uprugom osnovanii s pomoshch'yu zavisimosti «zhestkost'-krivizna» [Nonlinear calculation of a reinforced concrete beam on an elastic base using the «stiffness-curvature» relationship]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]*, (1), 37–46. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.37538/0039-2383.2022.1.37.46.
19. Solomin, V.I. & Shmatkov, S.B. (1986). *Metody rascheta i optimal'noe proektirovanie zhelezobetonnykh fundamentnykh konstruksii*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
20. Kozunova, O.B. (2022). Sovershenstvovanie metodiki rascheta gibkikh ortotropnykh plit na uprugom osnovanii. Chast' 2. Rezul'taty rascheta [Improvement of Calculation Technique for Flexible Orthotropic Plates on Elastic Base. Part 2. Calculation Results]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 21 (4), 290–296. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-4-290-296.

Поступила 16.11.2022

CONSIDERATION OF THE PHYSICAL NONLINEARITY OF ORTHOTROPIC PLATE IN THE STATIC CALCULATION OF AN INFINITE REGULAR SYSTEM OF PLATES ON AN ELASTIC LAYER

O. KOZUNOVA, K. SIROSH
(Belarusian State University of Transport, Gomel)

An infinite regular system of orthotropic plates on an elastic layer rigidly connected to a non-deformable base is considered. Nonlinear calculation of an infinite regular system of plates on an isotropic basis is performed by the variational-difference method (VRM), which is characterized by the replacement of differential equations by finite-difference approximations. The numerical solution of the resulting system of equations is performed using an iterative algorithm.

When finding the variable stiffness of the plate on the elastic layer, the "stiffness – curvature" dependence on the *Straw* in the directions of the axes of inertia is used. According to the found cylindrical bending stiffness from the ratio of S.P. Timoshenko, the torsion stiffness of the plate is determined for each iteration. The energy of deformation of the elastic base is replaced by the work of reactive pressures in the contact zone of the structure on the basis of the law of conservation of energy.

The analysis of the results of elastic and nonlinear calculations (3rd iteration) was carried out for the values of the orthotropic plate sediment and contact stresses in the zone of interaction of the plate with the elastic base.

Keywords: infinite regular plate system, orthotropic plate, variation-difference method, elastic layer, contact zone, plate deflections, base precipitation, contact stresses, internal forces, physical nonlinearity.

УДК 624.012.4545

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-29-44

**РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ****д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ,
канд. техн. наук, доц. Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ, А.И. ГИЛЬ****(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

В материале статьи объединены методы расчета основных параметров сопротивления железобетонных конструкций: деформационная расчетная модель поперечного сечения на основе диаграмм деформирования бетона и арматуры, блочная модель на основе закона сцепления арматуры с бетоном и метод конечных элементов для вычисления внутренних усилий. На примере неразрезной балки показана возможность вычисления параметров напряженно-деформированного состояния в любом поперечном сечении, на любой стадии работы конструкции, избегая использования эмпирических зависимостей.

Выполнено моделирование работы железобетона с трещинами при изгибе. Представлен алгоритм расчета параметров напряженно-деформированного состояния неразрезной изгибаемой конструкции при действии нагрузки с моделированием эквивалентного равновесного состояния поперечного сечения при образовании трещины. Выполнено сопоставление экспериментальных и расчетных параметров статически неопределимой железобетонной балки. Определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: сопротивление железобетона, деформационная модель, блочная модель, метод конечных элементов, неразрезная балка, напряженно-деформированное состояние.

Введение. Сопротивление железобетона внешним воздействиям отличается от других материалов строительных конструкций. Основное отличие заключается в возможности появления трещин в бетоне. Проявление этого характеристического свойства железобетона при работе конструкции под нагрузкой не является критическим с точки зрения прочности и долговечности, если раскрытие трещин не превышает допустимой величины. Особенность работы железобетона с трещинами проявляется в распределении внутренних усилий в статически неопределимых конструкциях, зависящем от их жесткости, которая резко снижается в сечениях конструкций вблизи трещин. Величина жесткости строительной конструкции используется и для вычисления ее деформаций (прогибов), частот собственных колебаний при различных воздействиях.

Работа железобетонной конструкции под нагрузкой разделяется на несколько стадий [1; 2], основными из которых являются: до и в момент появления трещин; после появления трещин до начала разрушения; в момент разрушения. Согласно [2], в теории сопротивления железобетона при проектировании необходимо рассчитать четыре основных параметра: момент образования трещин; раскрытие трещин после их появления; жесткость и связанные с ней деформации (прогибы); несущую способность (прочность).

Современный этап развития теории сопротивления железобетона внешним воздействиям характеризуется широким применением сложных математических моделей его работы и вычислительных средств для расчетов. Используемые методы расчета основных параметров сопротивления железобетонных конструкций: деформационная расчетная модель поперечного сечения на основе диаграмм деформирования бетона и арматуры, блочная модель на основе закона сцепления арматуры с бетоном и метод конечных элементов для вычисления внутренних усилий.

Названные методы для расчета статически неопределимых изгибаемых железобетонных элементов в нормативных документах^{1, 2, 3} не находятся в методическом единстве. Так, деформационная расчетная модель используется для вычисления момента образования трещин и прочности элемента; блочная модель железобетона между трещинами – для вычисления раскрытия трещин; методы строительной механики (в т.ч. метод конечных элементов) на основе жесткости элементов – для вычисления их внутренних усилий и прогибов. При вычислении жесткости железобетонного элемента с использованием деформационной модели не учитывается работа растянутого бетона над трещиной и на участке между трещинами или учитывается эмпирическими зависимостями. Относительные деформации (напряжения) арматуры в поперечном сечении с трещиной нормального отрыва для вычисления ширины раскрытия по блочной модели рассчитывают на основе деформационной модели сечений по внутренним усилиям, полученным методами строительной механики. Вычисленные параметры железобетонной конструкции при этом оказывают взаимное влияние друг на друга.

Цель настоящей работы: методически объединить названные методы расчета напряженно-деформированного состояния и отдельных параметров железобетонной конструкции и показать на примере неразрезной балки возможность их вычисления в любом поперечном сечении, на любой стадии работы конструкции, избегая использования эмпирических зависимостей.

Исходные данные. Шарнирно опертая неразрезная двухпролетная железобетонная балка с расстоянием между осями опор 1800 мм поперечным сечением 120×190 мм, загруженная сосредоточенными силами в третях пролетов

¹CEB-FIB Model Code for Concrete Structures 2010. URL: <https://www.wiley.com/en-us/fib+Model+Code+for+Concrete+Structures+2010-p-9783433604083>.

²СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : СП 63.13330.2018. – Введ. 20.06.19. – М. : Стандартинформ, 2018. – 143 с.

³Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 16.11.20. – Минск : Стройтехнорм, 2020. – 236 с.

(по две в каждом пролете). Ширина опор балки составляет 100 мм. Балка симметрично армирована в верхней и нижней зонах продольной стержневой арматурой (по $2\phi 12$ мм, $A_s=A_{s1}=226,19$ мм²) с пределом текучести 528,7 МПа, временным сопротивлением 592,8 МПа и относительным удлинением при разрыве 7,6%. Расстояние от верхней и нижней граней балки до центра тяжести поперечного сечения арматуры составляет 25 мм. Призматическая прочность бетона при сжатии $f_{cm}=32,6$ МПа, начальный модуль упругости при сжатии 31,38 ГПа, прочность бетона при растяжении $f_{ctm}=2,53$ МПа. Бетон балки изготовлен на бездобавочном портландцементе с гранитным щебнем крупностью 5...20 мм.

Диаграмма деформирования продольной стержневой арматуры балки при растяжении и сжатии принимается билинейной с ограничением относительных деформаций ее удлинением при разрыве.

Диаграмма деформирования бетона при сжатии принимается в виде криволинейной с нисходящей ветвью без ограничения ее длины по деформациям с целью получения полного перераспределения усилий между зонами в пролете и на опоре статически неопределимой балки. Для получения полной нелинейной диаграммы деформирования бетона изгибаемой конструкции на растяжение при изгибе вычисляем согласно⁴ прочность бетона на растяжение при изгибе $f_{ctm,fl}$ и согласно⁵ [3; 4] начальный модуль упругости при растяжении E_{ct} , относительные деформации $\varepsilon_{ctm,1}$ в пиковой точке диаграммы деформирования и предельную растяжимость бетона $\varepsilon_{ctm,u}$:

$$f_{ctm,fl} = f_{ctm} \cdot \left[1,6 - \frac{h}{1000} \right], \quad (1)$$

$$E_{ct} = \frac{10^7 \cdot f_{ctm}}{750 + 81,55 \cdot f_{ctm}}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ctm,1} = \frac{2 \cdot f_{ctm}}{E_{ct}}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ctm,u} = \frac{K \cdot \varepsilon_{ctm,1}}{2}, \quad (4)$$

$$K = 6,4 + 0,1223 \cdot f_{cm}. \quad (5)$$

Результаты вычислений для бетона рассматриваемой неразрезной балки следующие: $f_{ctm,fl}=3,57$ МПа; $E_{ct}=26,46$ ГПа; $\varepsilon_{ctm,1}=19,1 \cdot 10^{-5}$; $\varepsilon_{ctm,u}=1 \cdot 10^{-3}$.

Деформационная расчетная модель поперечного сечения при изгибе. В последнее время находит широкое применение метод сечений с использованием деформационной модели. При действии изгибающих моментов рассматривают сечения, нормальные к продольной оси элемента. Если элемент находится в равновесии, можно составить уравнения равновесия. Характерной особенностью модели является применение кроме уравнений равновесия условий деформирования сечения и диаграмм состояния бетона и арматуры. Согласно деформационной модели, поперечное сечение изгибаемого в одной плоскости элемента рассматривается как совокупность элементарных площадок (слоев), в пределах которых напряжения считаются равномерно распределенными.

Распределение деформаций по высоте поперечного сечения изгибаемого железобетонного элемента до появления трещин подчиняется гипотезе плоских сечений. После появления трещин в момент разрыва бетона растянутой зоны появляется сдвиг между арматурой и бетоном, сечение искривляется. По длине элемента деформации сжатой и растянутой зон сечения переменные, а нейтральная ось волнообразная (рисунок 1, а). При этом в сечении с трещиной участок поперечного сечения железобетонного элемента над трещиной остается плоским. Для поперечных сечений, расположенных на участке между трещинами, при отсутствии сдвига между арматурой и бетоном также справедлива гипотеза плоских сечений [2] (рисунок 1, б).

Многочисленные экспериментальные исследования показали справедливость названной гипотезы для железобетонных элементов, длина которых в 5 и более раз превышает максимальный размер поперечного сечения. Гипотеза плоских сечений широко используется в качестве допущения для железобетонных элементов, имеющих трещины в растянутой зоне, для осредненных продольных деформаций растянутой и сжатой зоны (рисунок 1, в). Но для оценки напряженно-деформированного состояния, вычисления жесткости после появления трещин и прочности изгибаемого железобетонного элемента следует рассматривать поперечное сечение с трещиной, по которому и происходит разрушение и для которого из-за сдвигов между арматурой и бетоном растянутой зоны гипотеза плоских сечений не справедлива. Кроме того, в сечениях между трещинами растягивающие усилия воспринимаются бетоном и арматурой, уменьшая деформации изгибаемого элемента.

В расчетной деформационной модели работа растянутой зоны бетона после образования трещин в постановке [2; 5] учитывается путем трансформирования диаграммы растяжения свободной арматуры (без бетона, в сечении с трещиной) в диаграмму, в которой напряжения σ_s приняты как свободной арматуры для сечения с трещиной, а относительные деформации ε_s – для осредненного сечения в соответствии с гипотезой плоских сечений, т.е. скорректированы в меньшую сторону с учетом коэффициента ψ_s ^{6, 7} [6]. Коэффициент ψ_s вычисляется по формуле:

$$\psi_s = 1 - 0,75 \cdot \varphi_{sl} \frac{\sigma_{crc}}{\sigma_s}, \quad (5)$$

⁴ См. сноску 3.

⁵ Kolleger, J. Comparison of Fixed and Rotating Crack Models in the Analysis of Panels, Plates and Shells Subjected to Shear // Proceedings Symposium on Concrete Shear in Earthquake, Houston. – P. 216–225.

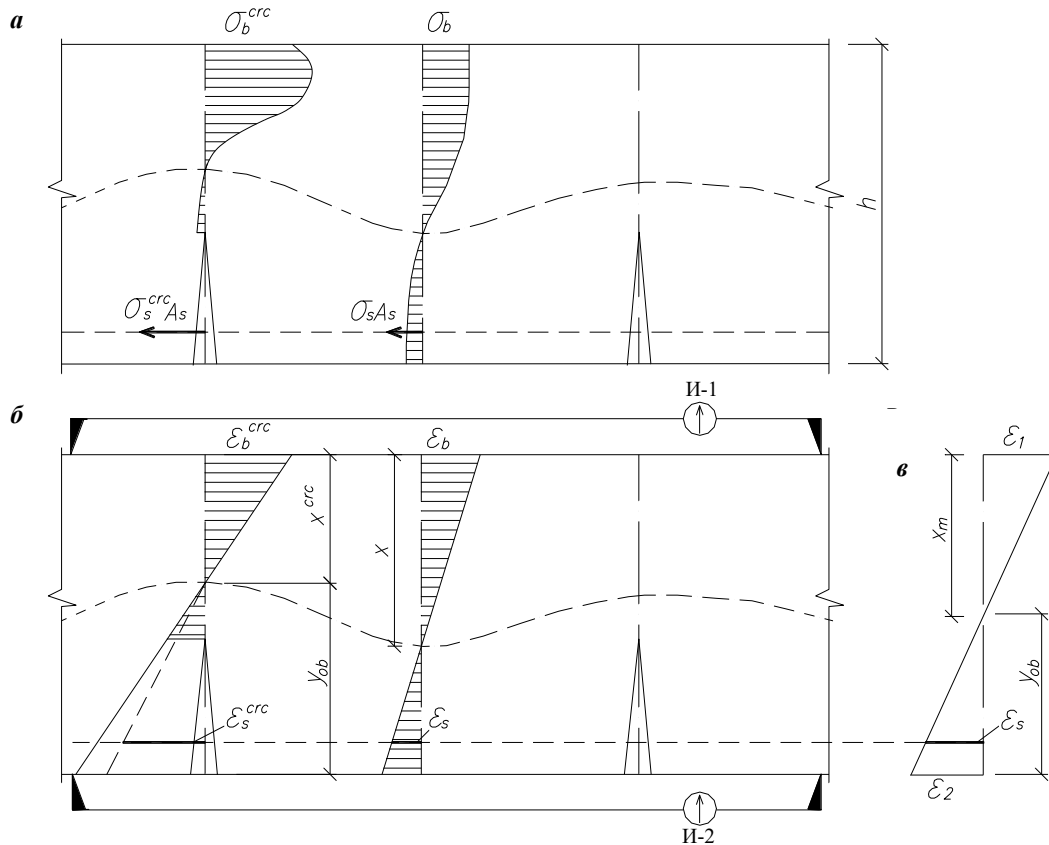
⁶ Методическое пособие. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования. – М.: М-во стр-ва и жилищно-коммунального хоз-ва Рос. Федерации, 2017. – 197 с.

⁷ Карпенко, С.Н. Модели деформирования железобетона в приращениях и методы расчета конструкций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / С.Н. Карпенко; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук. – М., 2010. – 48 с.

где σ_{crc} и σ_s – напряжения в арматуре в поперечном сечении с трещиной соответственно в момент образования трещины и текущее;

$\varphi_{sl} = 1$ – при кратковременном действии напряжений;

$\varphi_{sl} = 0,8$ – то же, при длительном.



а – распределение напряжений в поперечных сечениях; **б** – распределение относительных деформаций в поперечных сечениях; **в** – распределение средних относительных деформаций на участке элемента с трещинами

Рисунок 1. – Напряженно-деформированное состояние изгибаемого железобетонного элемента после образования трещин

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

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k \sigma_{ci} A_{ci} (y_0 - y_{ci}) + \sum_{i=k+1}^n \sigma_{si} A_{si} (y_0 - y_{si}) - M &= 0; \\ \sum_{i=1}^k \sigma_{ci} A_{ci} + \sum_{i=k+1}^n \sigma_{si} A_{si} &= 0; \\ \varepsilon_{(c,s)i} &= \frac{1}{r} (y_0 - y_{(c,s)i}), \quad \sigma_{ci} = f(\varepsilon_{ci}), \quad \sigma_{si} = f(\varepsilon_{si}), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\sigma_{(c,s)i}$ – нормальные напряжения в i -ой элементарной площадке бетона или арматуры;

$\varepsilon_{(c,s)i}$ – продольные деформации i -ой элементарной площадки бетона или арматуры;

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

Критерием образования трещин нормального отрыва является достижение элементарным слоем бетона на уровне центра тяжести арматурного стержня предельных относительных деформаций $\varepsilon_{ctm,u}$.

Максимальное значение внешней нагрузки, при котором выполняются условия равновесия (6) во всех поперечных сечениях, соответствует несущей способности статически неопределимой железобетонной конструкции.

Вычисление жесткости участка по длине изгибаемой железобетонной конструкции с трещинами производится с учетом работы растянутого бетона как среднее значение суммы жесткостей элементарных площадок бетона и арматуры по границам участка:

$$(EI)_j = \frac{[\sum_{i=1}^n E_{(c,s)i} A_{(c,s)i} (y_0 - y_{(c,s)i})^2]_j + [\sum_{i=1}^n E_{(c,s)i} A_{(c,s)i} (y_0 - y_{(c,s)i})^2]_{j+1}}{2}. \quad (7)$$

Блочная расчетная модель железобетонного элемента при изгибе. Описывает параметры напряженно-деформированного состояния железобетона между трещинами^{8,9} [7–9]. Исходными данными кроме характеристик бетона и арматуры являются напряжения (относительные деформации) в арматуре в поперечном сечении с трещиной.

Основными предпосылками модели для изгибаемого элемента являются¹⁰: изгибаемый железобетонный элемент – совокупность железобетонных блоков, разделенных в растянутой зоне трещинами нормального отрыва и связанных между собой бетоном сжатой зоны и растянутой арматурой; арматура и бетон растянутой зоны, которые работают совместно в соответствии с законом сцепления¹¹ [9], устанавливающим зависимость касательных напряжений по площади контакта арматуры диаметром $\varnothing$ с бетоном от их взаимного сдвига $\tau(s)$; напряжения в бетоне растянутой зоны, которые распределяются равномерно по эффективной площади $A_{c,eff}$.

Распределение относительных деформаций растянутого бетона и арматуры по длине блока описывается следующей системой уравнений (решается последовательными приближениями метода конечных разностей (рисунок 2)):

$$\begin{cases} \frac{d}{dx}s = \varepsilon_s(\sigma_s) - \varepsilon_c \left(\frac{N - \sigma_s \cdot A_s}{A_{c,eff}} \right) \\ \frac{d}{dx}\sigma_s = \frac{4}{\varnothing} \cdot \tau(s) \end{cases} \quad (8)$$

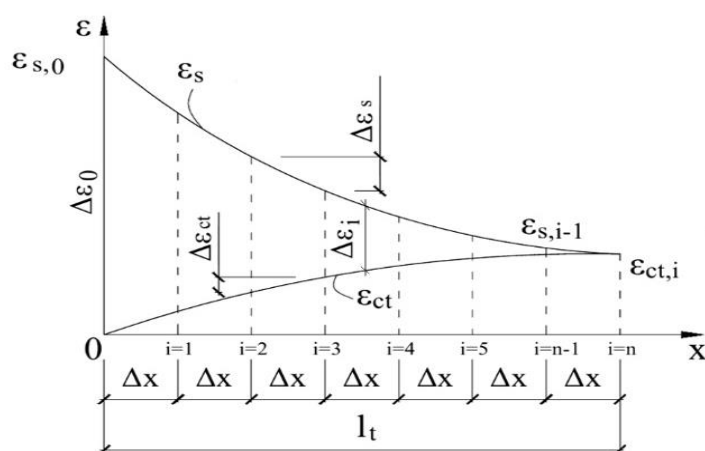


Рисунок 2. – Распределение относительных деформаций бетона и арматуры в железобетонном блоке со стороны трещины

Рассматривают две стадии трещинообразования в работе под нагрузкой изгибаемого железобетонного элемента⁹: первая – неустановившегося трещинообразования, когда при увеличении изгибающего момента по длине железобетонного элемента появляются трещины нормального отрыва; вторая – установившегося трещинообразования, когда количество трещин практически не увеличивается (происходит перераспределение усилий между арматурой и бетоном по длине железобетонного блока в соответствии с взаимными сдвигами из-за нарушения сцепления).

На первой стадии трещинообразования в железобетонном блоке относительные деформации бетона не превышают значений предельной растяжимости бетона, т.е. зоны сдвигов (перераспределения) со стороны двух смежных трещин не перекрываются (рисунок 3, а). При увеличении изгибающего момента относительные деформации бетона на уровне центра тяжести арматуры в зоне совместного деформирования достигают значений $\varepsilon_{ctm,u}$, происходит деление новыми трещинами нормального отрыва на более мелкие железобетонные блоки.

На второй стадии трещинообразования по всей длине железобетонного блока относительные деформации бетона на уровне центра тяжести арматуры $\varepsilon_{ctm} \leq \varepsilon_{ctm,u}$, т.е. зоны перераспределения двух смежных трещин перекрываются (рисунок 3, б). При увеличении изгибающего момента от внешней нагрузки происходят взаимные сдвиги арматуры и бетона (что проявляется в раскрытии трещин) и перераспределение усилий с бетона на арматуру.

Ширина раскрытия трещины нормального отрыва вычисляется как сумма взаимных смещений $s(x)$ арматуры и растянутого бетона в смежных железобетонных блоках по длине зон перераспределения l_t слева (l) и справа (r) от краев трещины нормального отрыва:

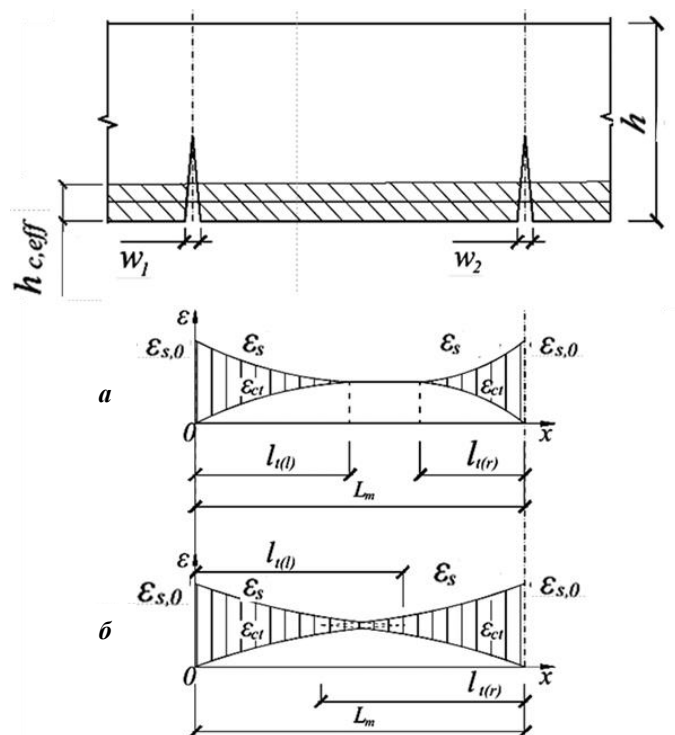
$$w = \int_{-l_t(l)}^{l_t(r)} s(x) dx = \int_{-l_t(l)}^{l_t(r)} [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_{ct}(x)] dx. \quad (9)$$

⁸ Васильев, П.И. Раскрытие швов и трещин в массивных бетонных конструкциях / П.И. Васильев, Е.Н. Пересыпкин // Аннотации законченных в 1967 г. научно-исследовательских работ по гидротехнике. – Л. : Энергия, 1968. – С. 292–294.

⁹ Починков, Ю.В. Блочная деформационная модель в расчетах железобетонных стержневых изгибаемых элементов с трещинами : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Ю.В. Починков. – Ростов на Дону, 2004. – 241 л.

¹⁰ Лазовский, А.Д. Сопротивление изгибу железобетонных многослойных плит перекрытий безопалубочного формирования в составе платформенных стыков зданий : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / А.Д. Лазовский. – Новополюк, 2017. – 152 л.

¹¹ См. сноску 3.



a – на первой стадии трещинообразования; *б* – на второй стадии трещинообразования

Рисунок 3. – Распределение относительных деформаций бетона и арматуры по длине железобетонного блока

Метод конечных элементов. Для вычисления внутренних усилий и деформаций от действия внешних нагрузок в изгибаемых балочных конструкциях применяются стержневые конечные элементы. Неразрезная опора моделируется двумя точечными опорами с расстоянием между ними, равным ее ширине (100 мм). Напряженно-деформированное состояние железобетонной конструкции определяется уравнением метода конечных элементов для вычисления перемещений:

$$\{\delta\} = [K]^{-1}\{F\}, \quad (10)$$

где $\{\delta\}$ – вектор перемещений;

$\{F\}$ – вектор внешней нагрузки;

$[K]$ – глобальная матрица жесткости системы.

Вектор внутренних усилий отдельно взятого конечного элемента определяют произведением локальной матрицы жесткости и вектора перемещений узлов конечного элемента. Построенная конечно элементная модель подвергается адаптивной дискретизации. Элементы модели подстраиваются под аналитические оценки зон проскальзывания арматуры, определенные с использованием блочной модели железобетона. Исходя из условия малости конечных элементов, рассматривают жесткостные характеристики элемента (участка изгибаемой неразрезной балки) как осредненные на его длине (формула (7)).

Моделирование работы железобетона с трещинами при изгибе. В изгибаемом железобетонном элементе до появления трещин в бетоне сопротивление растяжению оказывает бетон и продольная арматура. Относительные деформации растянутого бетона и арматуры благодаря сцеплению между ними равны между собой. С увеличением нагрузки в зоне максимальных изгибающих моментов на наиболее ослабленных участках (вследствие неоднородности структуры бетона и частично арматуры) растягивающие относительные деформации в бетоне приближаются к предельным и появляются трещины нормального отрыва. В сечении с трещиной и вблизи него сцепление нарушается, растягивающие усилия воспринимаются арматурой. После образования трещины напряжения (относительные деформации) по краям трещины в бетоне становятся равными нулю, и возникает разность относительных деформаций бетона и арматуры $\Delta\epsilon$. В соответствии с законом сцепления эта разность деформаций на расстоянии L от трещины уменьшается до нуля или до области, где относительные деформации в бетоне достигают предельных значений на растяжение. Если разбить участок сдвига арматуры и бетона растянутой зоны на ряд элементарных фрагментов, то на каждом i -ом фрагменте участка сдвига разность относительных деформаций имеет значение $\Delta\epsilon_i$, что определяет в арматуре дополнительное напряжение $\Delta\sigma_i$ (рисунок 2). Величина дополнительных относительных деформаций (дополнительного напряжения) изменяется по длине растянутого бетонного блока в зависимости от его значения в поперечном сечении с трещиной и значения взаимного сдвига арматуры и бетона (рисунок 4).

Дополнительное напряжение в арматуре, обусловленное возникшей разностью относительных деформаций между растянутой арматурой и бетоном, приводит к новому равносному состоянию поперечного сечения под нагрузкой. Изгибающий момент от внешней нагрузки в поперечном сечении с трещиной и между трещинами одинаков. В [10, с. 423–425] это явление называется «дополнительным состоянием».

Предлагается в деформационной модели поперечного сечения железобетонного элемента влияние дополнительного напряжения в арматуре учитывать, задавая соответствующее дополнительное напряжение (относительные деформации) арматурным стержням (аналогично моделированию предварительного напряжения арматуры) и анализируя состояние поперечного сечения в предыдущем моменте трещинообразования (рисунок 5).

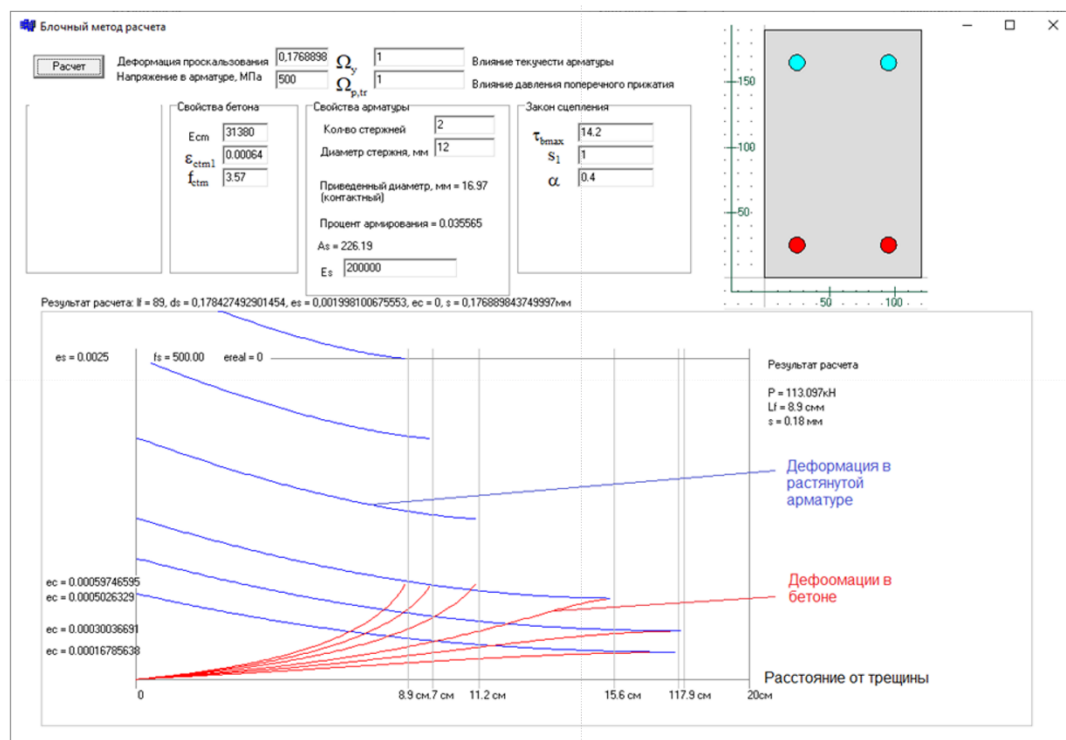
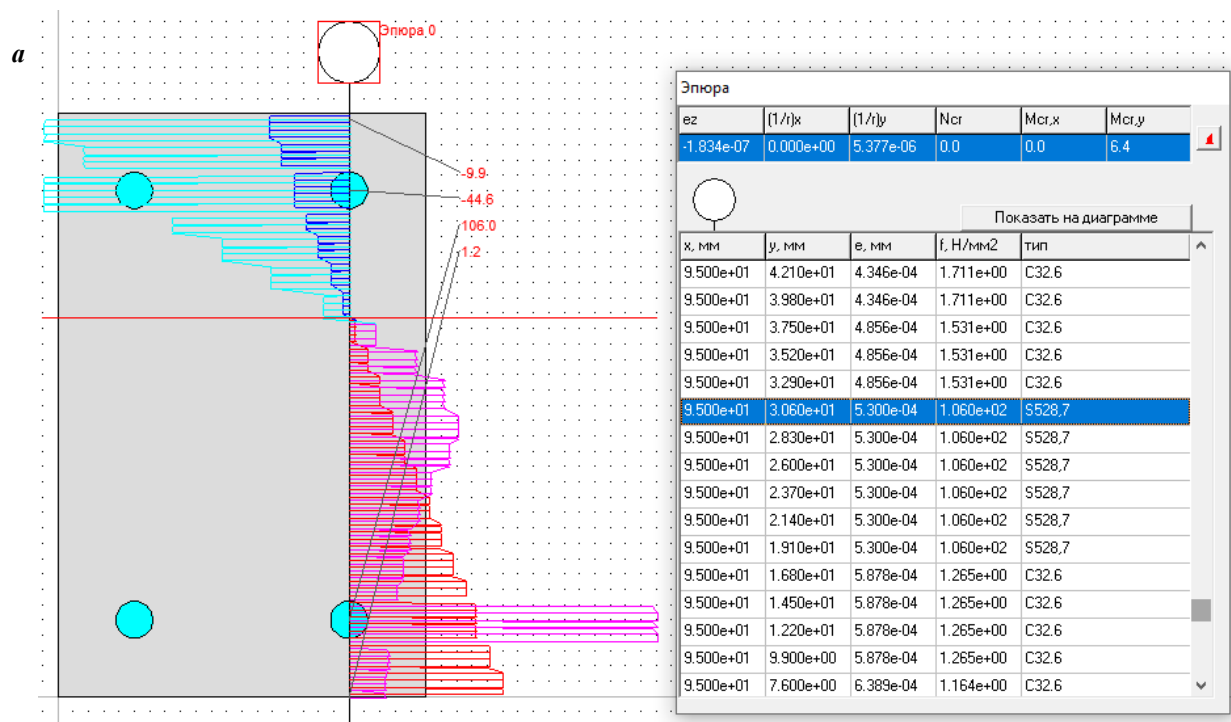
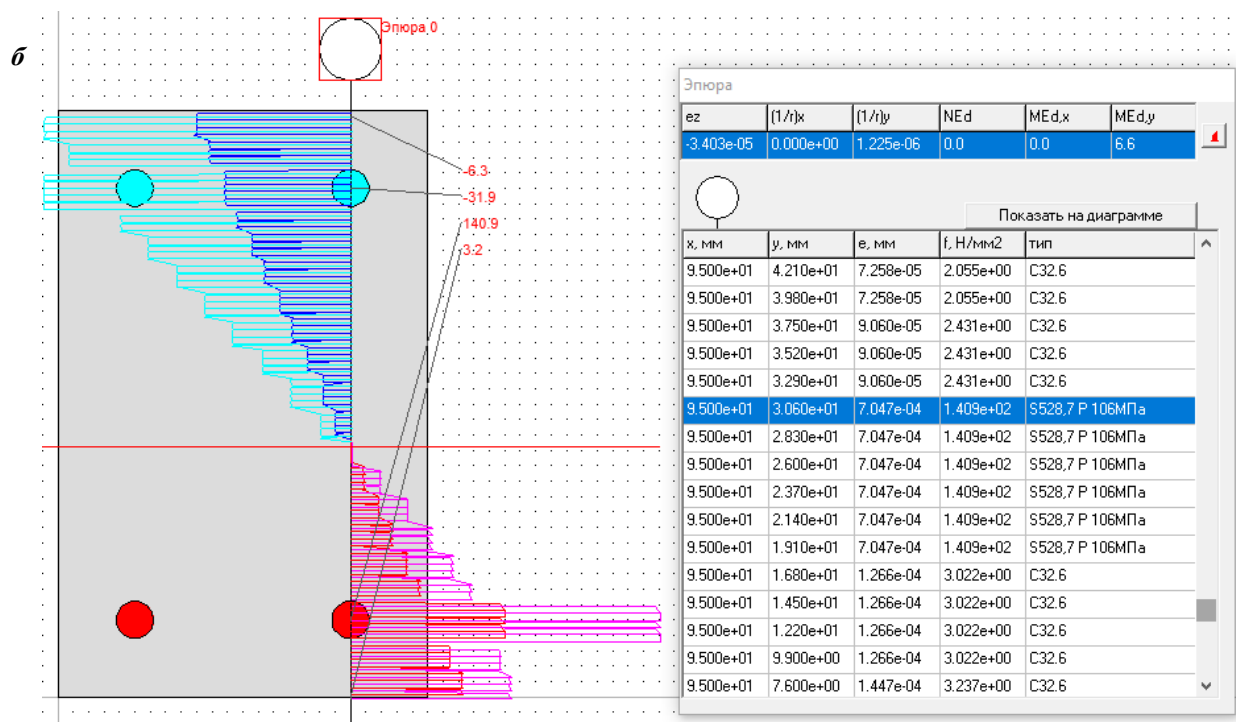


Рисунок 4. – Изменение относительных деформаций в растянутой арматуре и бетоне в зависимости от расстояния от трещины нормального отрыва при соответствующих значениях напряжения в растянутой арматуре в поперечном сечении с трещиной



а – перед образованием трещины (синим и красным цветом показано распределение по высоте поперечного сечения относительных деформаций соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым – аналогично, нормальных напряжений)

Рисунок 5. – Моделирование влияния дополнительного напряжения в арматуре на равновесное состояние участка блока балки без трещины (начало)



б – после приложения дополнительного усилия от взаимного сдвига бетона и арматуры (цифры на выносных линиях – нормальные напряжения в МПа) (синим и красным цветом показано распределение по высоте поперечного сечения относительных деформаций соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым – аналогично, нормальных напряжений)

Рисунок 5. – Моделирование влияния дополнительного напряжения в арматуре на равновесное состояние участка блока балки без трещины (окончание)

Важным эффектом в поперечных сечениях железобетонного элемента без трещины с дополнительным напряжением в растянутой арматуре является повышение изгибающего момента трещинообразования при увеличении нагрузки (рисунок 6) и, соответственно, повышение изгибной жесткости соседних с трещиной участков (рисунок 7). Изменения напряжения в растянутой арматуре и положения нейтральной линии в поперечном сечении с трещиной при увеличении изгибающего момента в зависимости от величины дополнительного напряжения в арматуре от сдвига представлены на рисунке 8.

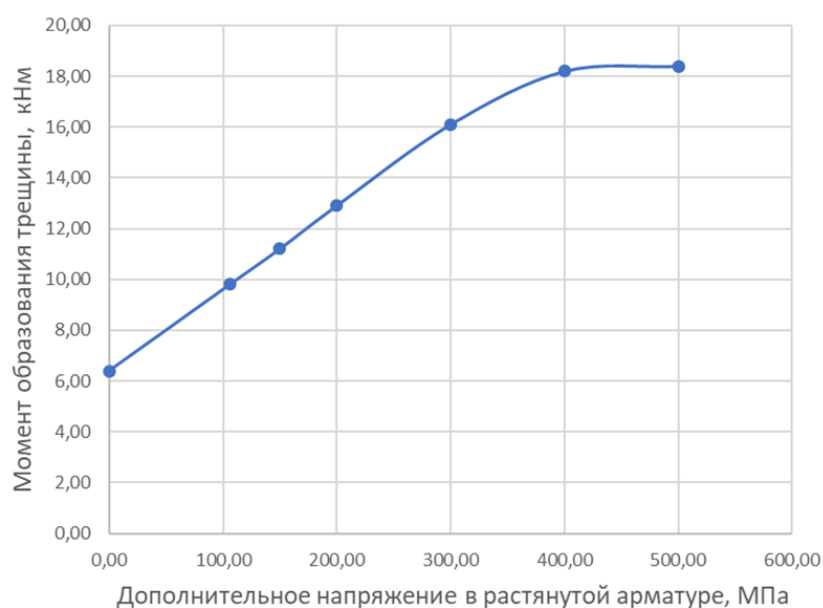


Рисунок 6. – Зависимость изгибающего момента образования трещины от дополнительного напряжения в растянутой арматуре

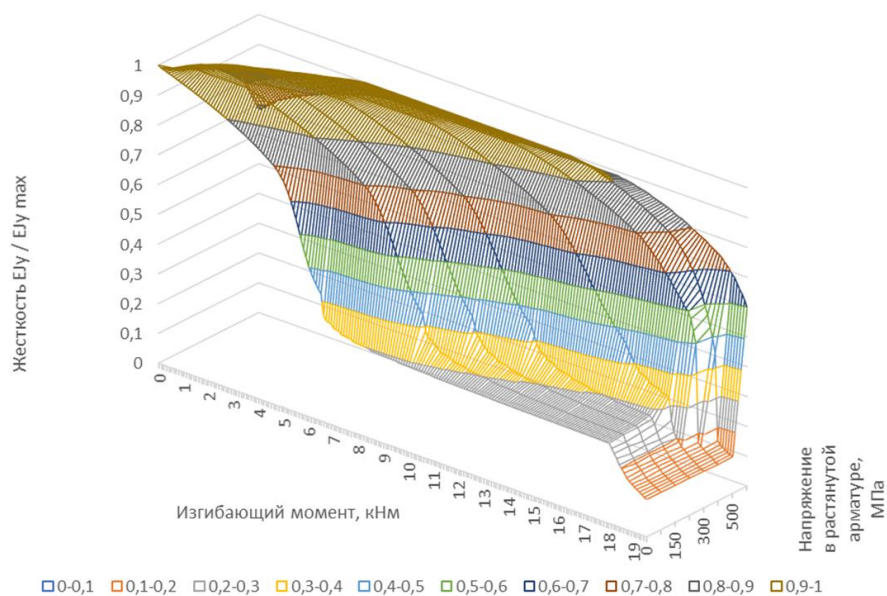
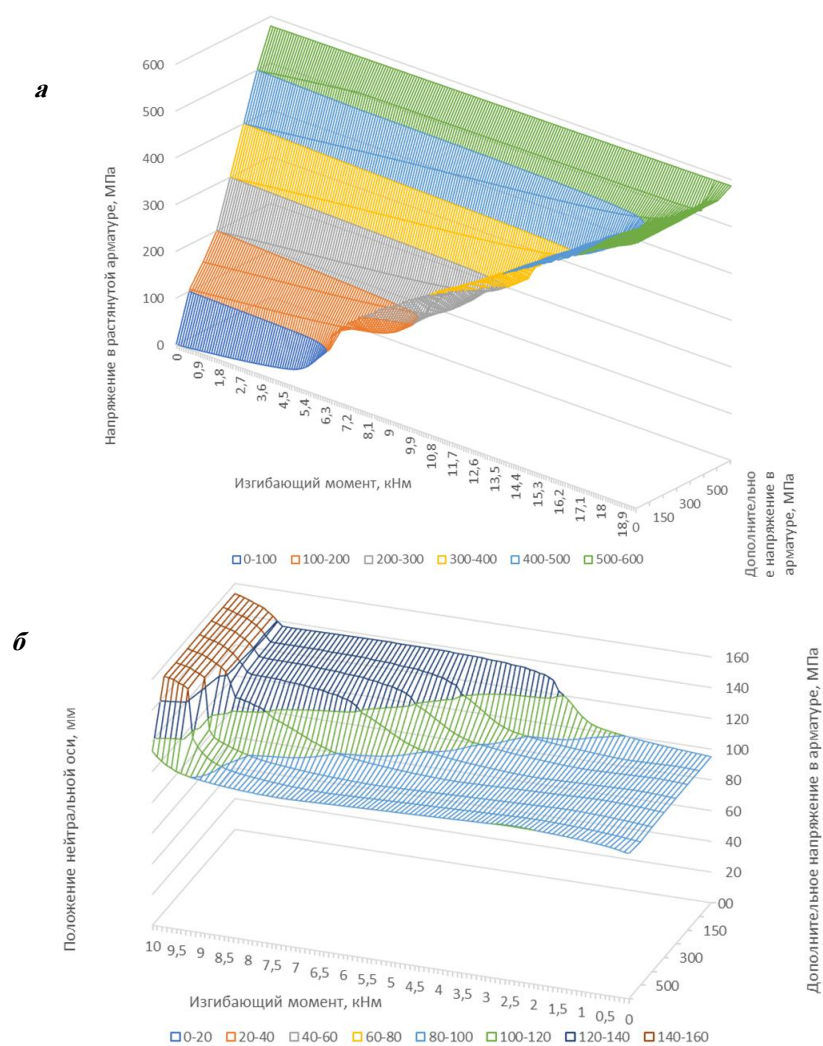


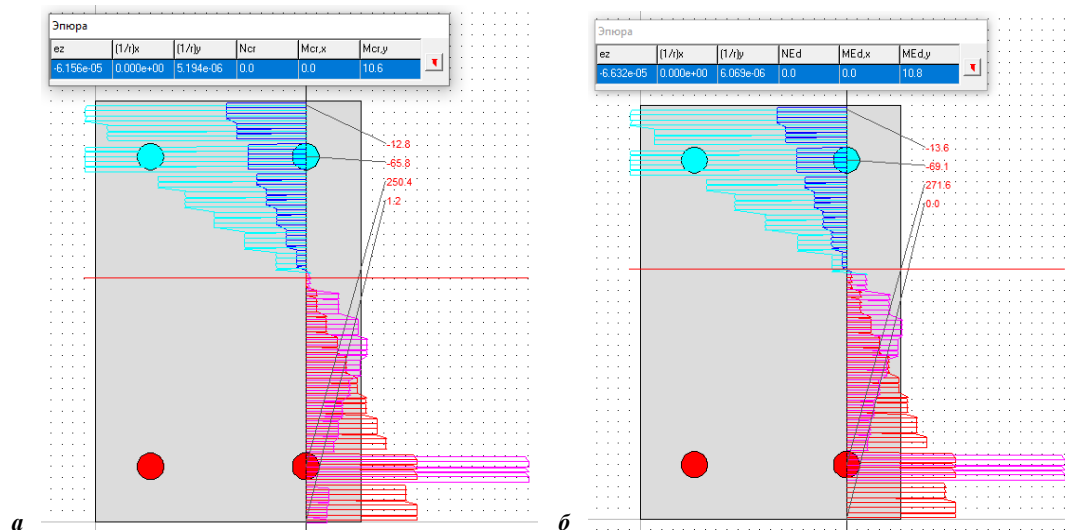
Рисунок 7. – Влияние дополнительного напряжения в растянутой арматуре в сечении с трещиной на изменение изгибной жесткости конечного элемента



а – напряжения в растянутой арматуре в поперечном сечении с трещиной;
б – положения нейтральной оси элемента y_0

Рисунок 8. – Зависимость от изгибающего момента при различных значениях дополнительного напряжения в растянутой арматуре в сечении с трещиной

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние в поперечных сечениях с трещиной и по длине бетонного блока между трещинами. На рисунке 9, *а* представлены распределение относительных деформаций и напряжений в поперечном сечении, где возможно появление трещины на второй стадии трещинообразования. Трещина нормального отрыва появляется в растянутом блоке в поперечном сечении между уже имеющимися трещинами, где дополнительное напряжение в результате взаимного сдвига арматуры и растянутого бетона не равно нулю. Например, дополнительное напряжение в арматуре от ближайшей трещины 130 МПа, что соответствует изгибающему моменту перед трещинообразованием 10,6 кНм (см. рисунок 6) и суммарному напряжению в арматуре $120,4 + 130 = 250,4$ МПа. Далее при увеличении нагрузки при изгибающем моменте 10,8 кНм появляется вторичная трещина, напряжения в арматуре в этом поперечном сечении резко возрастают до $141,8 + 130 = 271,8$ МПа, нейтральная ось смещается в направлении сжатой зоны (рисунок 9, *б*).



а – перед образованием трещины в растянутом блоке между трещинами; *б* – после образования трещины; (цифры на выносных линиях – нормальные напряжения в МПа) (синим и красным цветом показано распределение по высоте поперечного сечения относительных деформаций соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым – аналогично, нормальных напряжений)

Рисунок 9. – Моделирование напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении изгибаемого элемента

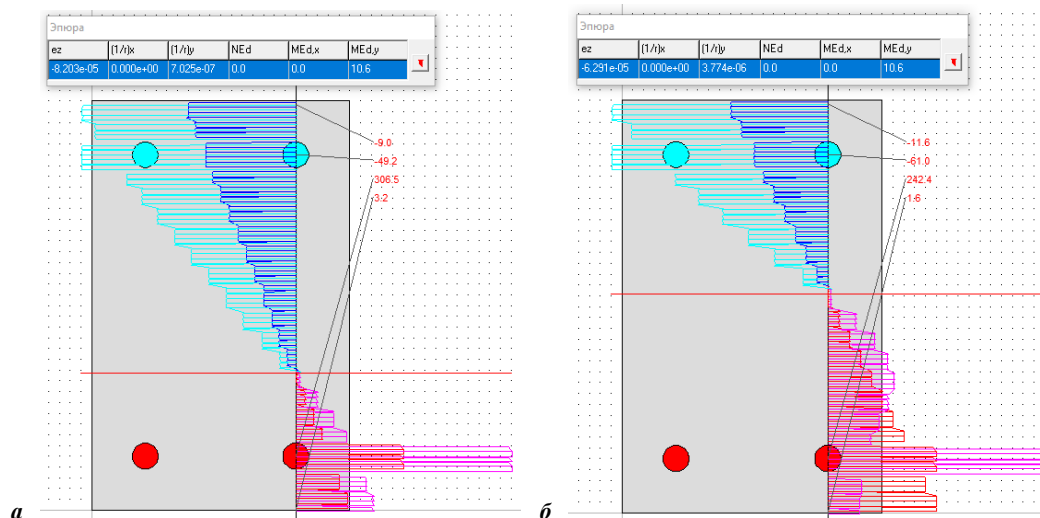
В поперечном сечении, проходящем по краю трещины, напряжения величиной 250,4 МПа в трещине за счет взаимного сдвига из-за потери сцепления арматуры и бетона становятся дополнительным напряжением (аналогично предварительному напряжению арматуры перед отпуском), а относительные деформации в бетоне резко уменьшаются на величину упругих деформаций до нулевых значений напряжения. В этом поперечном сечении трещины нет и не предвидится до изгибающего момента в нем 14,4 кНм (см. рисунок 6). В результате перераспределения усилий (арматура деформируется вместе в релаксирующем бетоне) напряжение в арматуре увеличилось до 306,5 МПа (рисунок 10, *а*). Увеличение напряжения в арматуре на величину $306,5 - 250,4 = 56,1$ МПа происходит в результате сжатия (релаксации) растянутого бетонного блока после образования трещины. Такое же напряжение (306,5 МПа) и в поперечном сечении с трещиной. Если рассматривать это состояние с точки зрения моделирования работы растянутого бетона путем трансформирования диаграммы деформирования арматуры с помощью коэффициента ψ_s , то при одних и тех же относительных деформациях в арматуре напряжения больше в сечении с трещиной. Это значение напряжения (56,1 МПа) в арматуре в предлагаемой модели учитывается повышением изгибающего момента образования трещин (на арматуру передано усилие с треснувшего растянутого бетона и его релаксации до нулевых напряжений).

В поперечном сечении в середине бетонного блока между трещинами дополнительное напряжение от сдвига составляет 150 МПа и напряжения в арматуре при том же изгибающем моменте 10,6 кНм равны 242,4 МПа при отсутствии трещины (рисунок 10, *б*).

Вычислив, согласно блочной модели, дополнительные относительные деформации (напряжения) в арматуре по длине участка ее сдвига в бетоне растянутой зоны и учитывая, согласно деформационной модели, новое равновесное состояние любого поперечного сечения (в том числе и сечения с трещиной), устанавливается соответствие распределения относительных деформаций бетона и арматуры по высоте поперечных сечений гипотезе плоских сечений. Таким образом, работа растянутого железобетона с трещинами в деформационной модели поперечного сечения с трещиной моделируется без применения коэффициента ψ_s . Получив в результате расчета распределение напряжений в растянутой арматуре по длине изгибаемой железобетонной конструкции с трещинами, само значение коэффициента ψ_s для анализа участия растянутой зоны бетона в работе изгибаемого железобетонного элемента вычисляется как отношение площади эпюры напряжений арматуры на длине блока, отделенного трещинами, к площади трапециевидной эпюры с ординатами-напряжениями в поперечных сечениях с трещинами по его концам.

Определив, согласно деформационной модели, распределение жесткостей по длине статически неопределимой железобетонной конструкции методами строительной механики (метод конечных элементов), вычисляют распределение внутренних усилий (изгибающих моментов) и деформаций (прогибов) по ее длине. Алгоритм расчета

параметров напряженно-деформированного состояния неразрезной изгибаемой конструкции при действии нагрузки с моделированием эквивалентного равновесного состояния поперечного сечения при образовании трещины представлен на рисунке 11.



а – по краю трещины; **б** – в середине бетонного блока между трещинами (цифры на выносных линиях – нормальные напряжения в МПа) (синим и красным цветом показано распределение по высоте поперечного сечения относительных деформаций соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым – аналогично, нормальных напряжений)

Рисунок 10. – Моделирование напряженно-деформированного состояния изгибаемого элемента в поперечном сечении

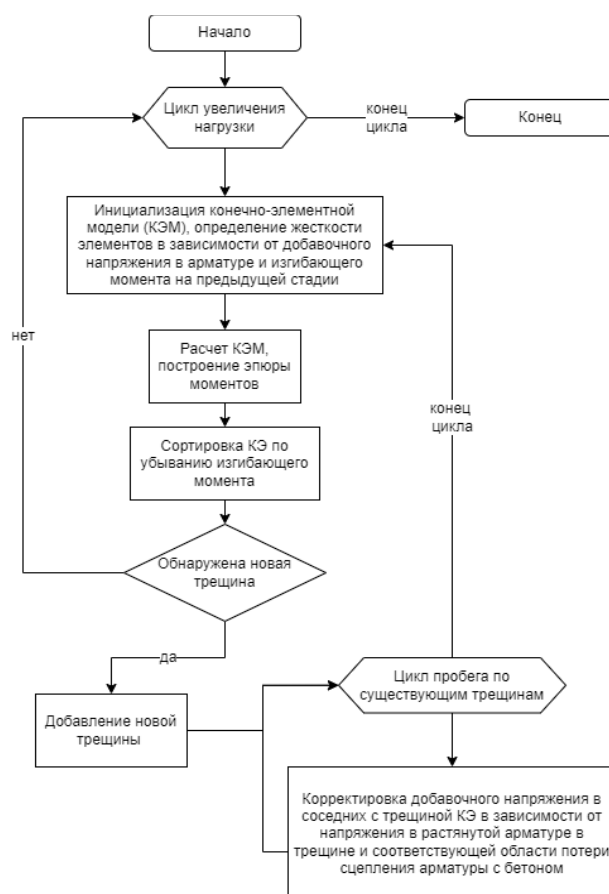
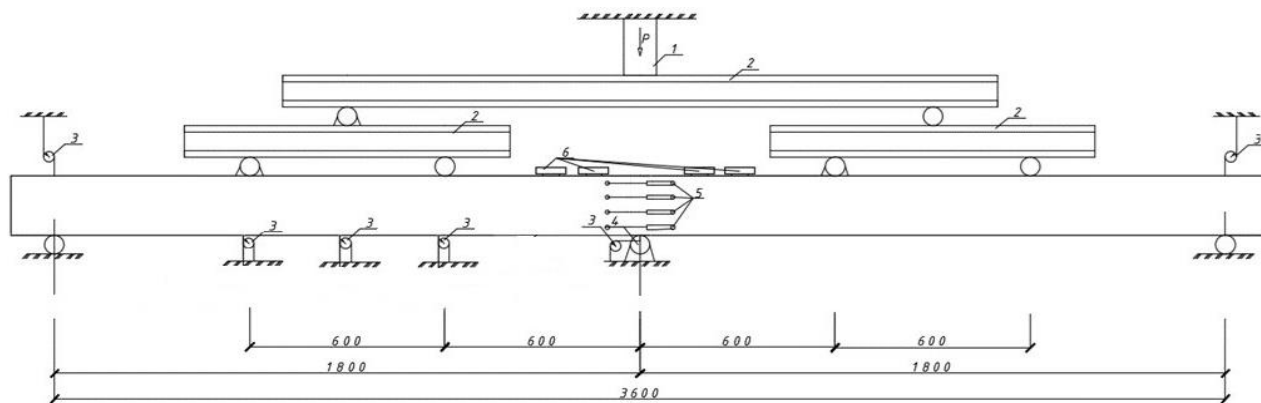


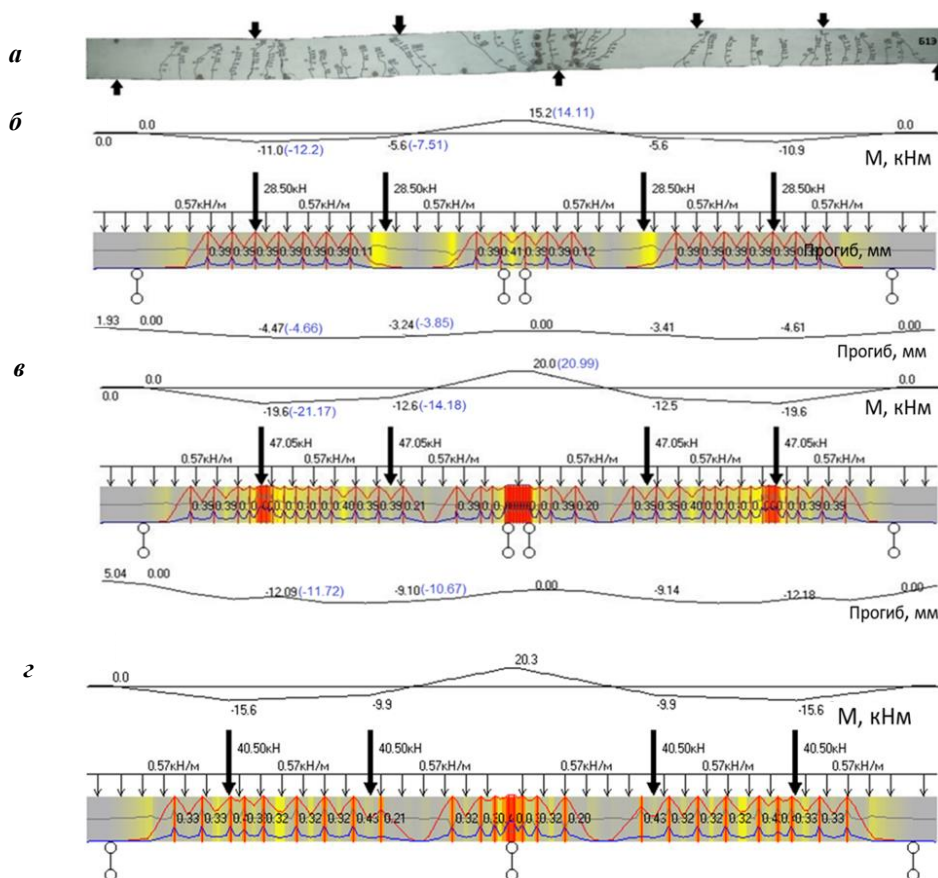
Рисунок 11. – Алгоритм расчета параметров напряженно-деформированного состояния статически неопределимой конструкции

Сопоставление результатов моделирования и испытаний неразрезной железобетонной балки. В соответствии с исходными данными была изготовлена и испытана до разрушения неразрезная железобетонная балка. Схема испытания балки приведена на рисунке 12. В процессе нагружения кратковременной нагрузкой с помощью

приборов фиксировались основные параметры железобетонной конструкции: изгибающий момент образования трещин; раскрытие трещин после их появления; прогибы; сосредоточенные усилия от внешней нагрузки, соответствующие несущей способности (прочности). Для раскрытия статической неопределимости на неразрезной опоре применялся динамометр. При вычислении распределения изгибающих моментов учитывалась разность осадок балки на неразрезной опоре и крайних опорах. Это позволило получить фактическую картину распределения экспериментальных изгибающих моментов и сопоставить с расчетными по предлагаемой методике на различных этапах нагружения. На рисунке 13 приведены: общий вид балки после разрушения; эпюры экспериментальных и расчетных изгибающих моментов при нагрузке, соответствующей несущей способности балки; расчетная модель балки перед разрушением.



1 – гидравлический домкрат; 2 – распределительная траверса; 3 – прогибомер;
4 – образцовый динамометр; 5 – измерители деформаций; 6 – электронный инклинометр
Рисунок 12. – Схема испытания неразрезной балки на изгиб



а – общий вид после разрушения; результат моделирования балки: б, в – соответственно при характеристическом значении нагрузки (28,5 кН) и перед разрушением (47,05 кН); г – перед разрушением (40,5 кН) при точечном опирании на средней опоре: эпюры расчетных (экспериментальных) изгибающих моментов (цифры в кНм), расчетная модель балки с местами трещин и шириной их раскрытия (вертикальные линии и цифры в мм), распределением относительных деформаций (синяя линия) и напряжений (красная линия) в арматуре, а также положения нейтральной линии (серая линия), прогибы балки арматуре, а также положения нейтральной линии (серая линия)

Рисунок 13. – Экспериментальная неразрезная железобетонная балка

Предложенная модель позволяет получить распределение всех параметров напряженно-деформированного состояния по длине неразрезной балки на любом этапе нагружения. Особенностью данной модели вследствие значительного шага увеличения внешней нагрузки являются несимметричные значения вычисленных параметров в двух пролетах. При появлении трещины в одном поперечном сечении в одном из пролетов балки происходит перераспределение жесткостей и, соответственно, усилий, которые перестают быть симметричными на следующем шаге увеличения нагрузки.

В предельном состоянии (перед разрушением) вблизи поперечных сечений с критическими трещинами (с максимальными изгибающими моментами на неразрезной опоре и в пролете) наблюдается резкое увеличение относительных деформаций в растянутой арматуре и близкое к равномерному распределение напряжений в арматуре по длине балки из-за нарушения сцепления с бетоном (рисунок 14). Это увеличение деформаций растянутой арматуры в поперечном сечении с критической трещиной увеличивает ширину ее раскрытия. При этом в соседних поперечных сечениях, в которых имеются трещины, происходит резкое уменьшение высоты сжатой зоны при практически тех же напряжениях в растянутой арматуре, что и в критической трещине.

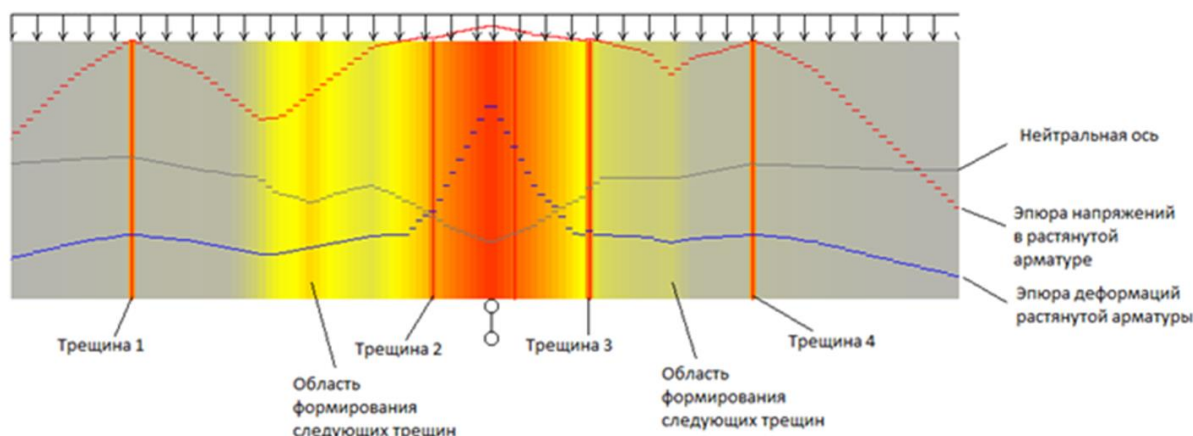


Рисунок 14. – Фрагмент расчетной модели балки у промежуточной опоры в предельном состоянии с местами трещин (вертикальные линии), распределением относительных деформаций (синяя линия) и напряжений (красная линия) в арматуре, а также положения нейтральной линии (серая линия)

Закключение. На примере неразрезной двухпролетной железобетонной балки продемонстрирована возможность методического объединения деформационной и блочной модели совместно с методом конечных элементов для вычисления напряженно-деформированного состояния и параметров железобетонной конструкции в любом поперечном сечении и на любой стадии ее работы.

Расчетная схема чувствительна к деталям (моделирование площадок опирания балок, ширины зоны передачи сосредоточенных нагрузок, точность в размерах). Например, в предельном состоянии для одной и той же балки с моделью опирания на площадку шириной 100 мм (см. рисунок 13, в) и моделью с идеализированным точечным опиранием (см. рисунок 13, г) предельные значения нагрузки отличаются более чем на 10%.

Моделирование работы статически неопределимой конструкции показывает, что при увеличении нагрузки в балке идет постоянный процесс перераспределения усилий, при этом при появлении новой трещины у опоры изгибающий момент «ползет» в пролет, при появлении трещины в пролете изгибающий момент «перетекает» к опоре. Происходят «качели», чем больше трещин, тем активнее, но с меньшими амплитудами идет раскочка. Каждая новая трещина разгружает прилегающие участки за счет проскальзывания арматуры в бетоне и уменьшения жесткости и, как следствие, за счет «утекания» изгибающего момента. Это приводит к уменьшению раскрытия трещин на участках балки, разгружаемых по изгибающему моменту. Перераспределение усилий идет в конкурирующих направлениях, этот процесс не направлен в одну сторону (с опоры в пролет или наоборот).

Моделирование процесса трещинообразования статически неопределимой конструкции показало, что область трещинообразования существенно шире точечного шарнира на неразрезной опоре в моделях статически неопределимых железобетонных конструкций (рисунок 15).

В таблице 1 приведено сопоставление экспериментальных [11] и расчетных (по предлагаемой модели) параметров для неразрезной железобетонной балки с выше названными исходными данными. Максимальное значение экспериментального и расчетного прогиба, а также ширины раскрытия трещин неразрезной балки определялось при нагрузке 28,5 кН, соответствующей ее характеристическому значению.

Таблица 1. – Сопоставление экспериментальных и расчетных параметров статически неопределимой железобетонной балки

Наименование параметра	Опытное значение	Расчетное значение	Отношение опытного значения к расчетному
Изгибающий момент образования трещин, кНм	5,92	6,6	0,89
Сосредоточенное усилие при разрушении, кН	46,95	47,05	0,99
Максимальное значение прогиба в пролете при 28,5 кН, мм	4,66	4,61	1,01
Максимальное раскрытие трещин в пролете при 28,5 кН, мм	0,33	0,39	0,82
Максимальное раскрытие трещин на опоре при 28,5 кН, мм	0,35	0,41	0,85

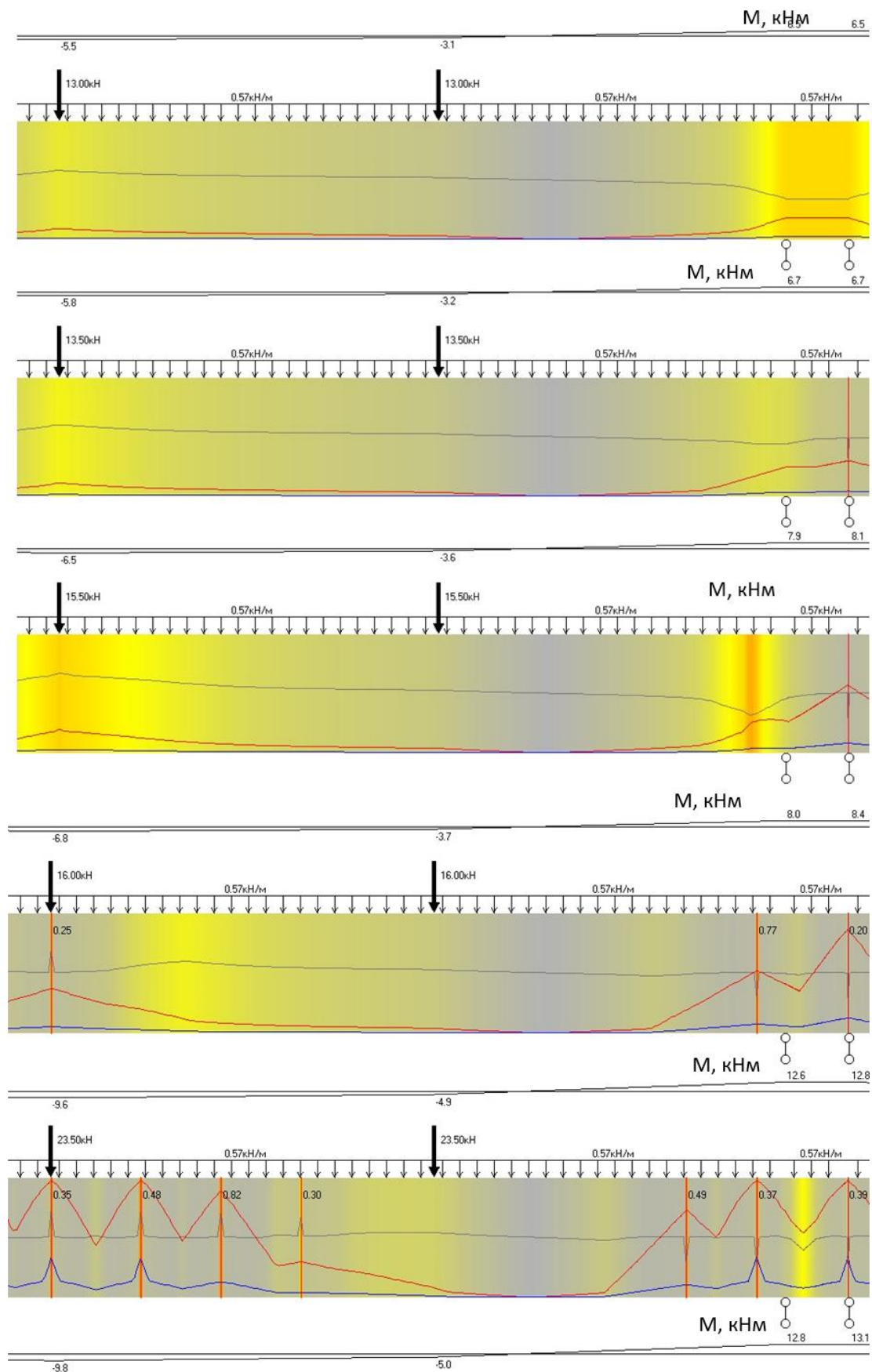


Рисунок 15. – Фрагмент модели неразрезной железобетонной балки с критическими трещинами и шириной их раскрытия (вертикальные линии и цифры в мм), эпюрами экспериментальных и расчетных изгибающих моментов, распределением относительных деформаций (синяя линия) и напряжений (красная линия) в арматуре, а также положения нейтральной линии (серая линия) (начало)

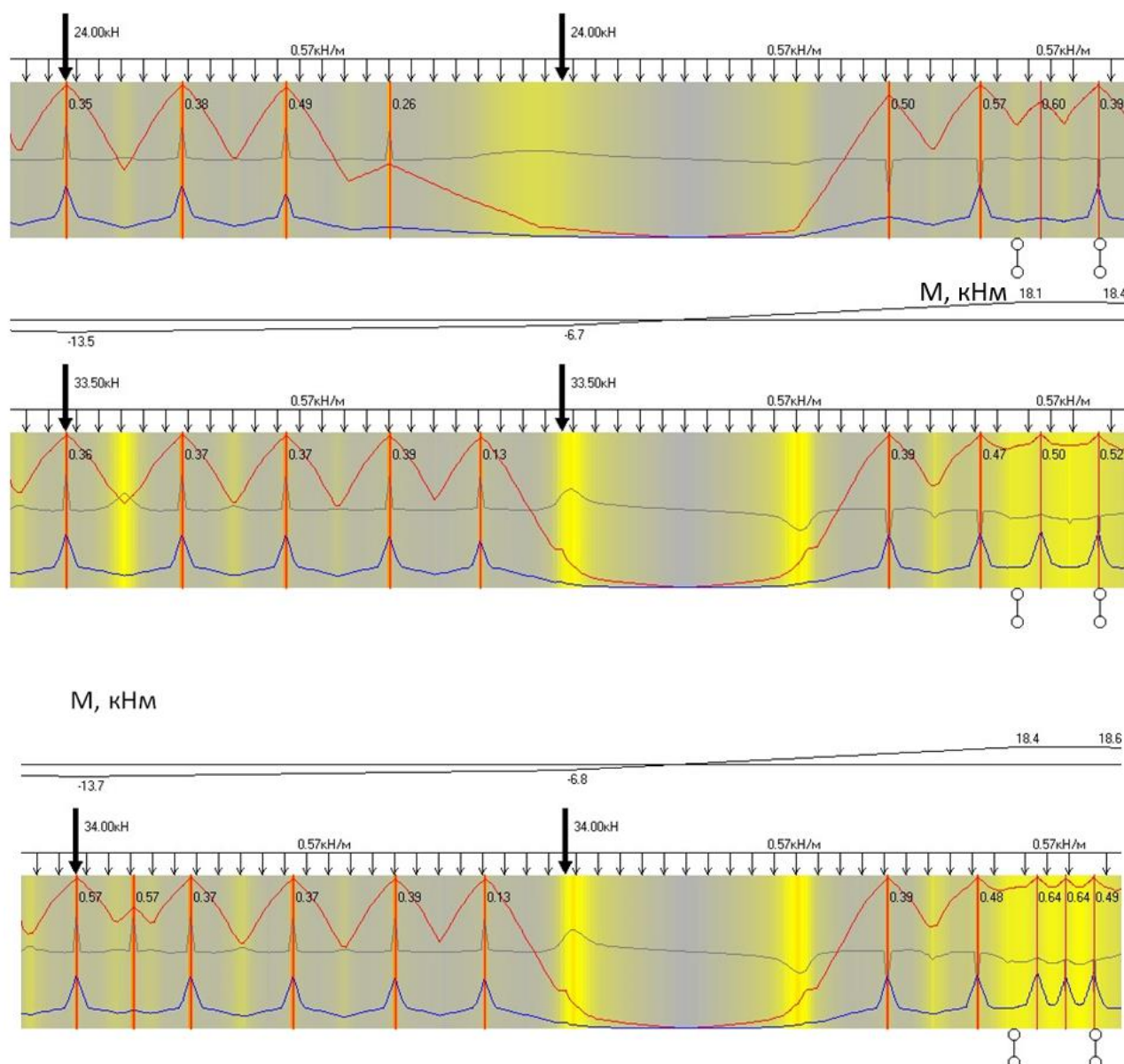


Рисунок 15. – Фрагмент модели неразрезной железобетонной балки с критическими трещинами и шириной их раскрытия (вертикальные линии и цифры в мм), эпюрами экспериментальных и расчетных изгибающих моментов, распределением относительных деформаций (синяя линия) и напряжений (красная линия) в арматуре, а также положения нейтральной линии (серая линия) (окончание)

Сопоставление основных параметров неразрезной железобетонной балки: изгибающего момента образования трещин; раскрытия трещин после их появления; прогибов; сосредоточенных усилий, соответствующих несущей способности (прочности), свидетельствует об их удовлетворительной сходимости.

Предложена модель учета работы растянутого бетона между трещинами наложением дополнительного напряжения в арматуре, обусловленного возникшей разностью относительных деформаций между растянутой арматурой и бетоном при образовании трещины, что приводит к новому равновесному состоянию поперечного сечения под нагрузкой.

Определены направления дальнейших исследований (рисунок 16):

- объединение модели нормального и наклонного сечения. Исследования показали, что модель сечения, нормального к продольной оси – частный случай более полной модели наклонного сечения.
- расчет по конечно-элементной модели с получением полей распределения всех параметров напряженно-деформированного состояния (нормальные и продольные деформации и напряжения, главные сжимающие и растягивающие напряжения и деформации, углы поворота элементарных площадок, направления развития трещин, в том числе в зонах действия поперечных усилий у опор).

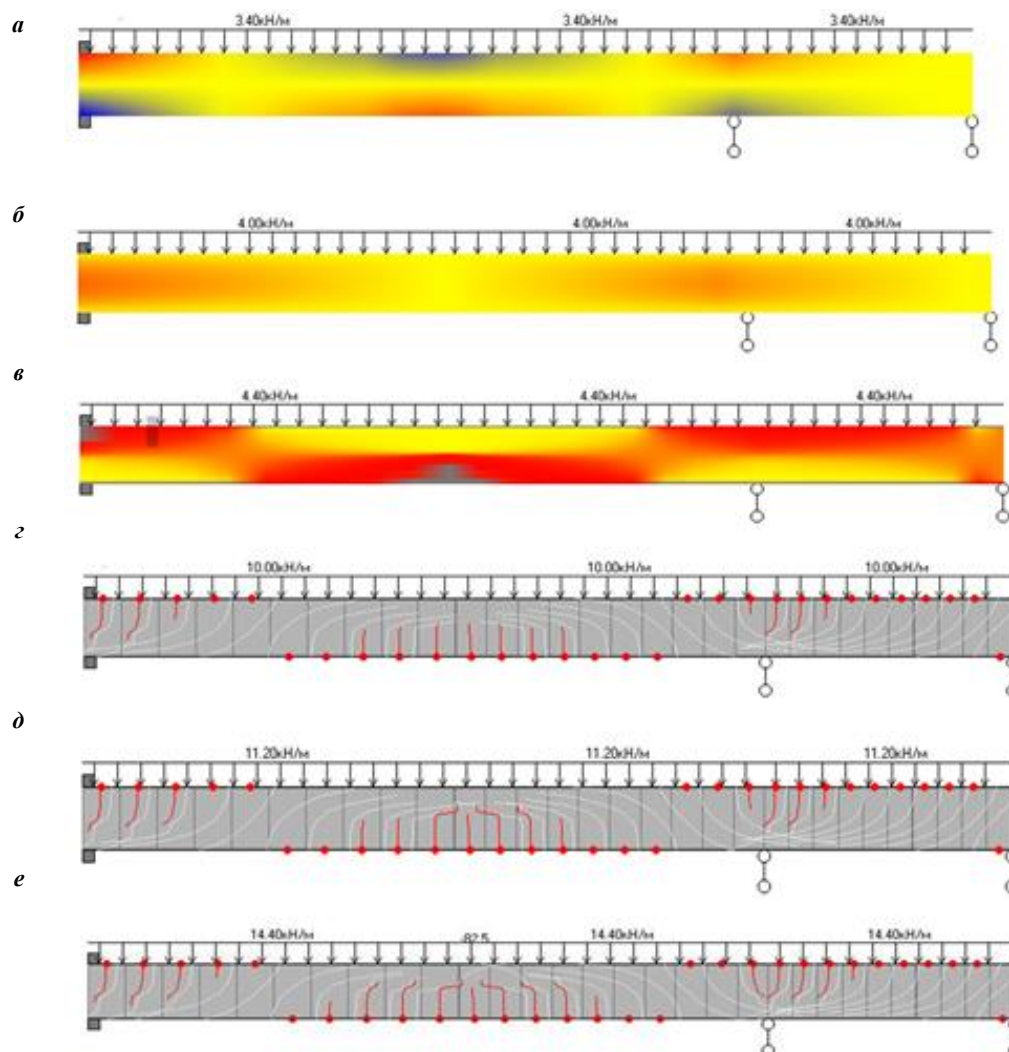


Рисунок 16. – Распределение в расчетной модели балки полей нормальных напряжений (а); касательных напряжений (б); углов поворота сечений (в); траектории трещин при различной величине нагрузки (г, д, е)

ЛИТЕРАТУРА

1. Гвоздев, А.А. О пересмотре способов расчета железобетонных конструкций и о первых его результатах / А.А. Гвоздев. – М. ; Л. : Госстройиздат, 1934. – 49 с.
2. Мурашев, В.И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона / В.И. Мурашев. – М. : Машстройиздат, 1950. – 268 с.
3. Bortolotti, L. First Cracking Load of Concrete Subjected to Direct Tension / L. Bortolotti // ACI Materials Journal. – 1991. – Vol. 88, № 1. – P. 70–73.
4. Тур, В.В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций : моногр. / В.В. Тур, Н.А. Рак. – Брест : БГТУ, 2003. – 252 с.
5. Немировский, А.М. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с учетом работы растянутого бетона над трещинами и пересмотр на этой основе теории расчета деформаций и раскрытия трещин / А.М. Немировский // Прочность и жесткость железобетонных конструкций : сб. тр. / под ред. А.А. Гвоздева. – М. : Стройиздат, 1968. – С. 152–173.
6. Лазовский, Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений / Д.Н. Лазовский. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 1998. – 240 с.
7. Westergaard, H.M. Computation of Stresses in Bridge Slabs Due to Wheel Loads / H.M. Westergaard // Public Roads. – 1930. – Vol. 11, № 1. – P. 1–23.
8. Croce, P. Numerical Simulation of the Behavior of Cracked Reinforced Concrete Members / P. Croce, P. Formichi // Materials Sciences and Applications. – 2014. – № 5. – P. 883–894.
9. Lowes, L.N. Concrete-Steel Bond Model for Use in Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures / L.N. Lowes, J.P. Moehle, S. Govindjee // ACI Structural Journal. – 2004. – Vol. 101, iss. 4. – P. 501–511.
10. Холмянский, М.М. Бетон и железобетон: Деформации и прочность / М.М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1997. – 569 с.
11. Гиль, А.И. Результаты экспериментальных исследований сопротивления изгибу статически неопределимых железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны опорного сечения / А.И. Гиль // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 58–64.

REFERENCES

1. Gvozdev, A.A. (1934). *O peresmotre sposobov rascheta zhelezobetonnykh konstruksii i o pervykh ego rezul'tatakh*. Moscow; Leningrad: Gosstroizdat. (In Russ.).
2. Murashev, V.I. (1950). *Treshchinoustoichivost', zhestkost' i prochnost' zhelezobetona*. Moscow: Mashstrojizdat. (In Russ.).
3. Bortolotti, L. (1991). First Cracking Load of Concrete Subjected to Direct Tension. *ACI Materials Journal*, 88 (1), 70–73.
4. Tur, V.V. & Rak, N.A. (2003). *Prochnost' i deformatsii betona v raschetakh konstruksii*. Brest: BGU. (In Russ.).
5. Nemirovskii, A.M. (1968). Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov s uchetoм raboty rastyanutogo betona nad treshchinami i peresmotr na etoi osnove teorii rascheta deformatsii i raskrytiya treshchin. In A.A. Grozdeva (Eds.) *Prochnost' i zhestkost' zhelezobetonnykh konstruksii: sb. tr.* (152–173). Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
6. Lazovskii, D.N. (1998). *Usilenie zhelezobetonnykh konstruksii ekspluatiruemykh stroitel'nykh sooruzhenii*. Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ.).
7. Westergaard, H.M. (1930). Computation of Stresses in Bridge Slabs Due to Wheel Loads. *Public Roads*, 11 (1), 1–23.
8. Croce, P. & Formichi, P. (2014). Numerical Simulation of the Behavior of Cracked Reinforced Concrete Members. *Materials Sciences and Applications*, (5), 883–894.
9. Lowes, L.N., Moehle, J.P. & Govindjee, S. (2004). Concrete-Steel Bond Model for Use in Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, 101 (4), 501–511.
10. Kholmyanskii, M.M. (1997). *Beton i zhelezobeton: Deformatsii i prochnost'*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
11. Gil', A.I. (2021). Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy soprotivleniya izgibu staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh balok s kombinirovannym armirovaniem rastyanutoi zony opornogo secheniya [Results of experimental research of bending resistance of statically indeterminate reinforced concrete beams with combined reinforcement of the stretched zone of the support section]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences]*, (16), 58–64. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 10.10.2022

**COMPUTATIONAL MODEL OF THE STRESS-STRAIN STATE
OF STATICALLY INDETERMINATE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

D. LAZOUSKI, D. GLUHAU, Y. LAZOUSKI, A. HIL
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article combines methods for calculating the main resistance parameters of reinforced concrete structures: a deformation calculation model of the cross section based on diagrams of concrete and reinforcement deformation, a block model based on the law of reinforcement adhesion with concrete and a finite element method for calculating internal forces. Using the example of a continuous beam, the possibility of calculating the parameters of the stress-strain state in any cross-section, at any stage of the construction, avoiding the use of empirical dependencies, is shown.

A simulation of the work of reinforced concrete with cracks during bending is performed. An algorithm is presented for calculating the parameters of the stress-strain state of an uncut bent structure under the action of a load with modeling of the equivalent equilibrium state of the cross section during crack formation. Comparison of experimental and calculated parameters of a statically indeterminate reinforced concrete beam is performed. The directions of further research are determined.

Keywords: resistance of reinforced concrete, deformation model, block model, finite element method, continuous beam, stress-strain state.

УДК 691.32:539.3/4.001.57

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-45-50

ПРОНИКНОВЕНИЕ ХЛОРИДОВ В БЕТОН: АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*д-р техн. наук, проф. С.Н. ЛЕОНОВИЧ**(Белорусский национальный технический университет, Минск)**Е.Е. ШАЛЫЙ**(Инженерной школы ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток)**Д.А. ЛИТВИНОВСКИЙ**(ООО «ИнжСпецСтройПроект», Минск)**А.В. СТЕПАНОВА**(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)**А.В. ЖУРАВСКАЯ**(Белорусский национальный технический университет, Минск)**В.В. МАЛЮК**(ООО «Трансстрой-Трест», Корсаков)*

Железобетонные конструкции подвергаются воздействию агрессивной среды. В этом случае комбинированные механические и экологические воздействия могут действовать одновременно, и их синергетические влияния должны быть учтены. В этой статье представлены и проанализированы результаты испытаний на двух различных типах бетонов. Определено капиллярное поглощение карбонизированного и некарбонизированного бетона. Изучено влияние механической нагрузки на капиллярное всасывание. Умеренная сжимающая нагрузка снижает коэффициент капиллярного всасывания, в то время как капиллярное всасывание усиливается более высокими механическими нагрузками по мере образования микротрещин. Диффузия хлоридов была оценена с помощью теста диффузионной ячейки. Коэффициент диффузии в карбонизированном бетоне на порядок выше, чем в некарбонизированном бетоне.

Ключевые слова: хлоридная диффузия, капиллярное всасывание, карбонизация, комбинированное действие.

Введение. Железобетонные конструкции часто подвергаются воздействию агрессивной среды. В большинстве случаев существует не один доминирующий процесс, такой как карбонизация или проникновение хлорида, который в конечном итоге ограничит срок службы конструкции, а сочетание механических и экологических нагрузок. Однако некоторые концепции прогнозирования или проектирования срока службы железобетонных конструкций не учитывают синергетические эффекты комбинаций нагрузок. При значительном ускорении деструктивных процессов при комбинированных нагрузках срок службы, прогнозируемый на основе одного доминирующего механизма, превышает реальный срок службы.

Имеется множество экспериментальных данных и прогностических моделей карбонизации и проникновения хлоридов в бетон [1–5]. В большинстве случаев был исследован один единственный механизм. Изучались температурное влияние и солевое загрязнение на карбонизацию цементных материалов. Обнаружена более высокая скорость карбонизации в загрязненном хлоридами бетоне. Нагао и Уэда [6] выяснили, что содержание растворимых хлоридов на карбонизированной поверхности вблизи зоны выше, чем в некарбонизированном бетоне. Пуатацананон и Саума [7] исследовали связь карбонизации и диффузии хлоридов с помощью численного моделирования. Они изучали роль образования и разложения соли Фриделя, в частности, в контексте карбонизации. Но до сих пор существуют спорные мнения о связывании хлоридов при карбонизации [6–8].

Проникновение хлорида в бетон регулируется двумя различными механизмами переноса: капиллярным всасыванием и диффузией. Поэтому было изучено влияние карбонизации и сжимающей нагрузки на капиллярное всасывание и влияние карбонизации на диффузию хлоридов.

Экспериментальные исследования. Подготовка образцов. Для серии испытаний были подготовлены два различных типа бетона. Состав приведен в таблице 1. В качестве минеральных вяжущих использовались портландцемент типа Р.О 52.5, доменный шлак типа S95 и зола-унос типа F. Добавлен речной песок с модулем крупности 2,6 и измельченные гранитные заполнители с максимальным диаметром 20 мм. После смешивания свежего бетона с водоредуцирующим агентом заполняются стальные формы с внутренним диаметром 100 мм и высотой 200 мм. Кроме того, образцы того же размера были подготовлены путем высевания крупных заполнителей из свежего бетона. В возрасте 21 дня цилиндры были разрезаны алмазной пилой пополам высотой 100 мм для испытания на капиллярное всасывание и в срезах толщиной 10 мм для испытания на диффузию и капиллярное всасывание. Некоторые цилиндры в возрасте 28 суток были загружены на 60% и 85% от предельной сжимающей нагрузки в течение 10 мин до испытания на капиллярное всасывание. В возрасте 28 дней все образцы высушены в печи при 50 °С в течение недели до постоянного веса. Затем половину образцов поместили в климатический шкаф для ускоренной карбонизации при 20 °С, 80% относительной влажности и 20% концентрации CO₂. После полной карбонизации снова высушивали перед измерением капиллярного всасывания.

Таблица 1. – Соотношение смесей двух типов бетона, кг/м³

Код	Минеральные вяжущие	Портланд Цемент	Микро-кремнезем	Шлак	Песок	Гравий	Водоредуцирующая добавка	Вода
СС1	476	238	100	138	683	1025	5,1	152
СС2	357	201	75	81	721	1082	2,8	161

Капиллярное всасывание. При контакте бетона с водой количество поглощенной воды ΔW описывается следующим уравнением [9]:

$$\Delta W = \left[A_0 + \frac{A_1 t}{(A_2 + t)} \right] \sqrt{t}, \quad (1)$$

где A_0 , A_1 и A_2 являются константами. В идеализированной системе прямых цилиндрических капилляров A_1 и A_2 равны нулю в уравнении (1), а поглощение воды капиллярным всасыванием как функция времени $\Delta W(t)$ может быть описано с помощью следующего уравнения:

$$\Delta W(t) = A\sqrt{t}. \quad (2)$$

В уравнении (2) коэффициент капиллярного всасывания A обозначает:

$$A = \psi \rho \sqrt{\frac{r_{eff} \sigma \cos \theta}{2\eta}}. \quad (3)$$

В уравнении (3):

Ψ обозначает емкость воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$ – это максимальное содержание воды, которое может быть поглощено капиллярной системой;

ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

η – вязкость, $(\text{Н}\cdot\text{с})/\text{м}^2$ (в зависимости от температуры);

θ – угол смачивания;

r_{eff} – распределение по размерам пор цементного камня на одну характерную длину, м. Если распределение пор по размерам смещено в сторону более крупных пор, коэффициент увеличивается и, следовательно, увеличивается A . Капиллярное всасывание является чувствительным методом исследования пористых систем [10].

Испытание диффузионной ячейки. Использованы обычные диффузионные ячейки для определения коэффициента диффузии хлоридов в бетоне и растворе [11–13]. Верхнюю клетку заполняли насыщенным раствором $\text{Ca}(\text{OH})_2$, содержащим 5% NaCl . Последующую клетку заполняли насыщенным раствором $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Концентрация хлоридов в последующей ячейке была определена с помощью калиброванного электрода. Из устойчивого состояния потока хлоридов J коэффициент диффузии D может быть получен с помощью первого закона Фика:

$$J = D \, dC/dx. \quad (4)$$

Из измеренных данных D можно вычислить в соответствии с соотношением:

$$D = b(VT/C_0A), \quad (5)$$

где T – толщина образца;

C_0 – начальная концентрация хлоридов в верхнем коллекторе;

A – поперечное сечение образца;

V – объем нисходящего коллектора;

b – постоянный градиент концентрации хлоридов в образце.

Результаты и обсуждение. Капиллярное всасывание. Результаты капиллярного всасывания показаны на рисунках 1 и 2. Масса поглощенной воды, отнесенная к поперечному сечению образцов, является функцией квадратного корня времени. Линейное отношение, заданное уравнением (1), действительно только в течение короткого периода капиллярного всасывания. Бетон CC2 с В/Ц = 0,45 поглощает больше воды, чем бетон CC1 с В/Ц = 0,32. Объемное содержание цементного камня в CC1 составляет 33,7%, а в CC2 – 30,2%. Это означает, что более высокое водоцементное отношение в полной мере компенсирует меньшее содержание пасты. Если коэффициент капиллярного всасывания цементного камня оценивать по объемной концентрации в бетонах, получают значения на чистом цементном камне.

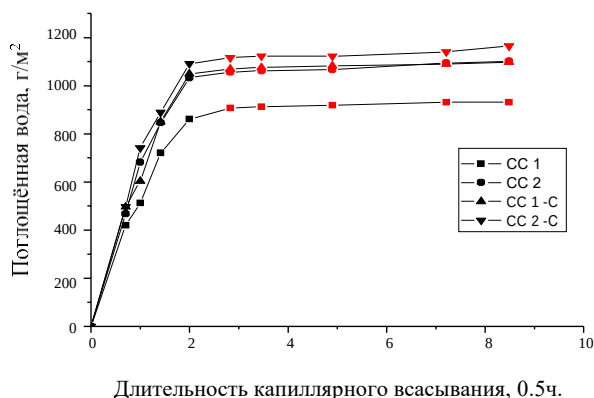


Рисунок 1. – Забор воды капиллярным всасыванием

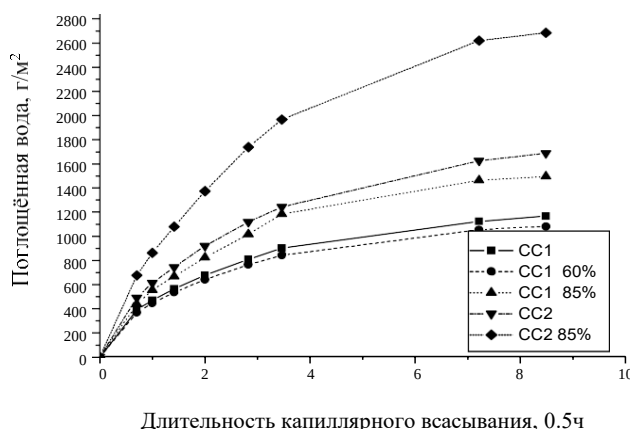


Рисунок 2. – Капиллярное всасывание ненагруженного и нагруженного карбонизированного и некарбонизированного бетона. Уровень нагружения бетона 60% и 85% прочности

При длительном контакте с водой карбонизированный бетон поглощает больше воды, чем некарбонизированный. Йоханнессон и Утгенант [14] изучали изменения микроструктуры в результате карбонизации. Они обнаружили, что объем капиллярных пор с радиусом от 0,2 до $0,7 \times 10^{-8}$ м увеличивается во время карбонизации.

Коэффициенты капиллярного всасывания A в течение первых 4 часов приведены в таблице 2. Очевидно, что коэффициент капиллярного всасывания для СС1 после ускоренной карбонизации на 19,8% выше, чем у некарбонизированного бетона, в то время как коэффициент капиллярного всасывания СС2 на 6,1% выше после ускоренной карбонизации. Емкость воды Ψ может быть определена на рисунке 1 равной 90 кг/м^3 для СС1 и 108 кг/м^3 для СС2. С помощью Ψ можно вычислить глубину проникновения x жидкости: $x(t) = Bt^{1/2} = A/\Psi \rho t^{1/2}$.

Таблица 2. – Коэффициент капиллярного всасывания бетона (нагружаемые образцы некарбонизированы)

Код	Коэффициент поглощения $A, \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right]$ при различных уровнях нагрузки				
	Некарбонизированный	Ускоренная карбонизация	Не загружено	Уровень нагрузки 60%	Уровень нагрузки 85%
СС1	473,5	567,4	387,2	366,4	461,3
СС2	570,0	604,7	514,2	-	749,0

Капиллярное всасывание было определено после загрузки цилиндров в течение 10 минут на 60% и 85% от максимальной сжимающей нагрузки (см. рисунок 2). Образцы представляют собой цилиндры высотой 100 мм. Компрессионная нагрузка в 60% уменьшает капиллярное всасывание, но при приложении более высокой сжимающей нагрузки капиллярное всасывание снова увеличивается. При 60% максимальной нагрузки образуется только несколько микротрещин, но некоторые поры закрыты. Это изменение объема может быть выражено в терминах ползучести. При нагрузках 85% и выше снижение объема перекомпенсируется и будут образовываться новые микротрещины [14–23].

Испытание диффузионной ячейки. Изменение концентрации хлоридов в нисходящем коллекторе во времени представлено на рисунках 3–6. Результаты измерений в бетоне показаны на рисунке 3 и 4. Эквивалентные результаты на образцах раствора показаны на рисунках 5 и 6. На основе этих данных были рассчитаны коэффициенты диффузии хлоридов с помощью уравнений (3) и (4).

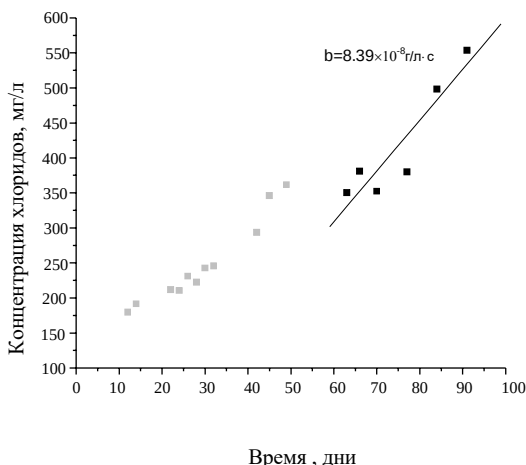
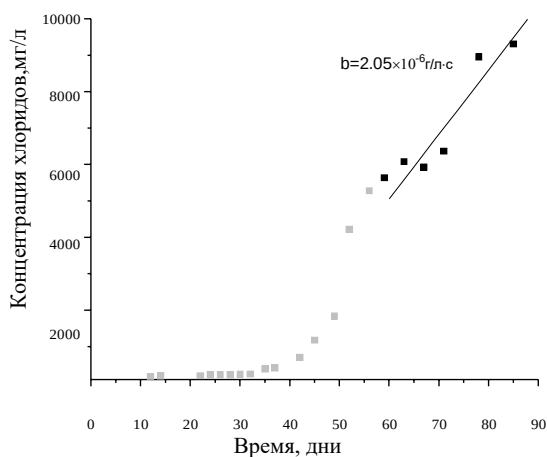
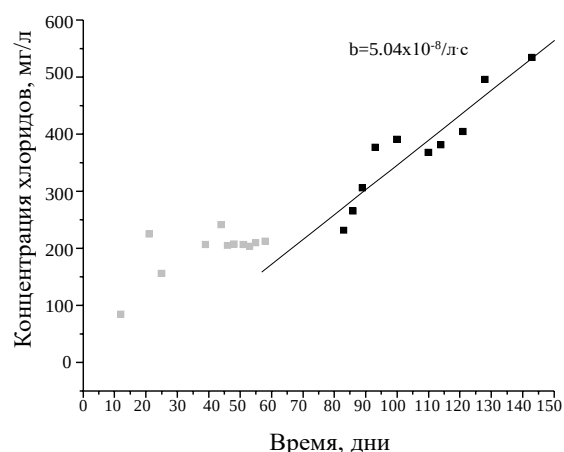
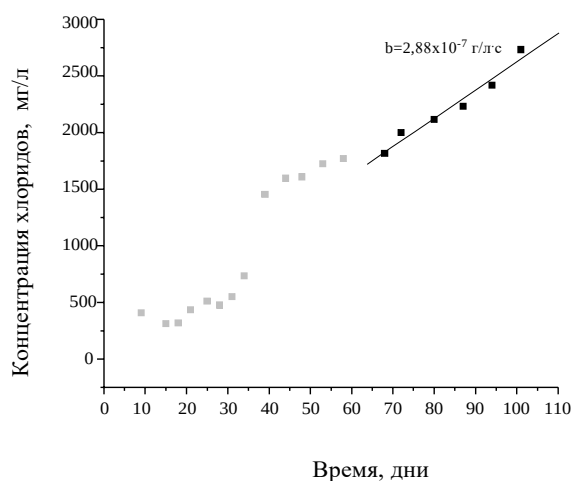


Таблица 3. – Расчет коэффициента диффузии хлоридов

Код	Коэффициент диффузии хлоридов, D , [$\times 10^{-6} \text{ мм}^2/\text{с}$]			
	Некарбонизированный		Ускоренная карбонизация	
	Бетон	Мелкозернистый цементный бетон	Бетон	Мелкозернистый цементный бетон
CC1	2,06	3,38	14,8	81,6
CC2	7,39	7,56	54,9	79,4

По аналогии с капиллярным всасыванием коэффициент диффузии хлоридов бетона в мелкозернистом цементном бетоне CC2 выше, чем у CC1. После карбонизации коэффициент диффузии значительно возрастает. Это можно объяснить тем, что в мелкозернистом цементном бетоне наблюдается более высокая концентрация цементного камня, который подвергается карбонизации.

Выводы. Карбонизация оказывает значительное влияние на капиллярное всасывание и диффузию хлоридов. Это важнейшие механизмы переноса хлоридов в бетон. Коэффициент капиллярного всасывания и коэффициент диффузии увеличиваются за счет карбонизации. Это объясняется распределением пор по размерам. Исчезают нанопоры, и образуются более грубые капиллярные поры. Ускоряется миграция хлоридов в карбонизированном бетоне. Кроме того, умеренная сжимающая нагрузка снижает коэффициент капиллярного всасывания. В то же время капиллярное всасывание увеличивается за счет более высоких механических нагрузок по мере образования микротрещин. Если для прогнозирования срока службы бетонных конструкций в естественной среде используются коэффициенты диффузии хлоридов, которые были определены на некарбонизированном или ненагруженном бетоне, прогноз не будет реалистичным [16–22].

ЛИТЕРАТУРА

1. Цзинь, В.Л. Долговечность бетонной конструкции / В.Л. Цзинь, Ю.Х. Чжао. – Пекин : Сайенс Пресс, 2002. – С. 29–34.
2. Нью, Д.Т. Прогноз долговечности и ресурса железобетонных конструкций / Д.Т. Нью. – Пекин : Сайенс Пресс, 2003. – С. 16–22.
3. Нагеш, М. Моделирование диффузии хлоридов в бетоне и определение коэффициентов диффузии / М. Нагеш, Б. Бхаттачарджи // Журнал материалов ACI. – 1998. – № 4. – С. 113–120.
4. Си, Ю. Моделирование проникновения хлоридов в насыщенный бетон / Ю. Си, З. Базант // Журнал материалов в области гражданского строительства. – 1999. – № 1. – С. 58–65.
5. Маслехуддин, М. Влияние температурного и соляного загрязнения на карбонизацию цемента / М. Маслехуддин, К.Л. Пейдж, Ж.Г. Рашидузафар // Журнал материалов в области гражданского строительства. – 1996. – № 2. – С. 63–69.
6. Нагао, К. Применение опреснения для смешивания бетона с летучей золой или доменным шлаком / К. Нагао, Т. Уэда // Международный журнал современной физики В. – 2003. – Т. 17, № 8–9. – С. 1452–1457.
7. Пуатацананон, В. Нелинейная связь карбонизации и диффузии хлоридов в бетоне / В. Пуатацананон, В.Э. Саума // Журнал материалов в области гражданского строительства. – 2005. – № 3. – С. 264–275.
8. Гони, С. Ускоренная карбонизация соли Фриделя в цементной пасте из алюмината кальция / С. Гони, А. Герреро // Исследование цемента и бетона. – 2003. – № 33. – С. 21–26.
9. Чжань, Х. Связь между профилями илиевой смолы в водоотталкивающем обработанном бетоне и эффективностью в качестве хлоридного барьера / Х. Чжань, Ф.Х. Виттман, Т. Чжао // Реставрация зданий и памятников. – 2005. – № 11. – С. 35–45.
10. Ханжич, Л. Взаимосвязь между жидкостной сорбцией и капиллярностью в бетоне. Цемент и бетон / Л. Ханжич, Р. Илич // Исследование цемента и бетона. – 2003. – № 33. – С. 1385–1388.
11. Гласс, Г.К. Теоретическая оценка теста диффузионной ячейки устойчивого состояния / Г.К. Гласс, Н.Р. Буэнфельд // Журнал материаловедения. – 1998. – № 33. – С. 5111–5118.
12. Макдональд, К.А. Экспериментальные измерения скорости диффузии хлорид-ионов с использованием двухсравнительной диффузионной ячейки: эффекты материала и тестовых варивлов / К.А. Макдональд, Д.О. Нортвуд // Исследование цемента и бетона. – 1995. – № 25. – С. 1407–1416.
13. Буэнфельд, Н.Р. Диффузия хлоридов через образцы раствора, обработанные поверхностью / Н.Р. Буэнфельд и Й.З. Чжан // Исследование цемента и бетона. – 1998. – № 28. – С. 665–674.
14. Йоханнессон, Б. Микроструктурные изменения, вызванные карбонизацией цементного раствора / Б. Йоханнессон, П. Утгелант // Исследование цемента и бетона. – 2001. – № 31. – С. 925–931.
15. Нгала, В.Т. Влияние карбонизации на структуру пор и диффузионные свойства гидратированных паст / В.Т. Нгала, К.Л. Пейдж // Исследование цемента и бетона. – 1997. – № 27. – С. 995–1007.
16. Фан, Ю.Х. Влияние карбонизации на микроструктуру затвердевшей цементной пасты и раствора / Ю.Х. Фан, Я.Т. Чжан, У.С. Шнейдер // Журнал Хохайского университета (естественные науки). – 2005. – Т. 33, № 1. – С. 104–107.
17. Леонович, С.Н. Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при хлоридной агрессии / С.Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь : сб. тр. VII Междунар. науч.-метод. семинара / М-во образования Респ. Беларусь, М-во архитектуры Респ. Беларусь, Брестский гос. техн. ун-т, Республиканский образовательный центр, Междунар. образовательный центр СФ БГПА, Белорус. инженерная акад. ; под ред. Н.П. Блещика, А.А. Борисевича, Т.М. Пецольда. – Брест, 2001. – С. 432–434.
18. Леонович, С.Н. Вероятностная оценка коррозии арматуры в существующих железобетонных конструкциях при хлоридной агрессии / С.Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь : сб. тр. VII Междунар. науч.-метод. семинара / М-во образования Респ. Беларусь, М-во архитектуры Респ. Беларусь, Брестский гос. техн. ун-т, Республиканский образовательный центр, Междунар. образовательный центр СФ БГПА, Белорус. инженерная акад. ; под ред. Н.П. Блещика, А.А. Борисевича, Т.М. Пецольда. – Брест, 2001. – С. 435–440.
19. Леонович, С.Н. Железобетон в условиях хлоридной коррозии: деформирование и разрушение / С.Н. Леонович, А.В. Прасол // Строительные материалы. – 2013. – № 5. – С. 94–95.

20. Совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии на конструкционный бетон: вероятностная модель / Е.Е. Шалый [и др.] // Вестн. гражданских инженеров. – 2018. – Т. 3, № 68. – С. 123–131. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-123-131.
21. Шалый, Е.Е. Железобетон при воздействии карбонизации и хлоридной агрессии: вероятностная модель расчета-прогноза срока службы / Е.Е. Шалый, Л.В. Ким, С.Н. Леонович // Вестн. Белгородского гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 6. – С. 5–14. DOI: 10.12737/article_5b115a5ef027c2.76676320.
22. Шалый, Е.Е. Деградация железобетонных конструкций морских сооружений от совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии / Е.Е. Шалый, С.Н. Леонович, Л.В. Ким // Строительные материалы. – 2019. – № 5. – С. 67–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72.
23. Leonovich, S.N. Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction / S.N. Leonovich, E.E. Shalyi, L.V. Kim // Science & Technique. – 2019. – Vol. 18, № 14. – С. 284–291. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-284-291.

REFERENCES

1. Tszin', V.L. & Chzhao Y.Kh. (2002). *Dolgovechnost' betonnoi konstruksii*. Pekin: Saiens Press. (In Chinese).
2. Nyu, D.T. (2003). *Prognoz dolgovechnosti i resursa zhelezobetonnykh konstruksii*. Pekin: Saiens Press. (In Chinese).
3. Nagesh, M. & Bkhattachardzhi, B. (1998). Modelirovanie diffuzii khloridov v betone i opredelenie koeffitsientov diffuzii. *Zhurnal materialov ACI*, (4), 113–120. (In Russ.).
4. Si, Y. & Bazant, Z. (1999). Modelirovanie proniknoveniya khloridov v nasyshchennyi beton. *Zhurnal materialov v oblasti grazhdanskogo stroitel'stva*, (1), 58–65. (In Russ.).
5. Maslekhuddin, M., Peidzh, K.L. & Rashiduzzafar, Zh.G. (1996). Vliyanie temperaturnogo i solyanogo zagryazneniya na karbonizatsiyu tsementa. *Zhurnal materialov v oblasti grazhdanskogo stroitel'stva*, (2), 63–69. (In Russ.).
6. Nagao, K. & Ueda, T. (2003). Primenenie opresneniya dlya smeshivaniya betona s letuchei zoloi ili domennym shlakom. *Mezhdunarodnyi zhurnal sovremennoi fiziki B*, 17 (8–9), 1452–1457. (In Russ.).
7. Puatatsananon, V. & Sauma, V.E. (2005). Nelineinaya svyaz' karbonizatsii i diffuzii khloridov v betone. *Zhurnal materialov v oblasti grazhdanskogo stroitel'stva*, (3), 264–275. (In Russ.).
8. Goni, S. & Gerrero, A. (2003). Uskorennaya karbonizatsiya soli Fridelya v tsementnoi paste iz alyuminata kal'tsiya. *Issledovanie tsementa i betona*, (33), 21–26. (In Russ.).
9. Chzhazhan', Kh., Vittman, F.Kh. & Chzhazhan, T. (2005). Svyaz' mezhdu profilyami ilievoi smoly v vodoottalkivayushchem obrabotannom betone i effektivnost'yu v kachestve khloridnogo bar'era. *Restavratsiya zdaniy i pamyatnikov*, (11), 35–45. (In Russ.).
10. Khanzhich, L. & Ilich, R. (2003). Vzaimosvyaz' mezhdu zhidkostnoi sorbtsiei i kapillyarnost'yu v betone. Tsement i beton. *Issledovanie tsementa i betona*, (33), 1385–1388. (In Russ.).
11. Glass, G.K. & Buenfel'd, N.R. (1998). Teoreticheskaya otsenka testa diffuzionnoi yacheiki ustoichivogo sostoyaniya. *Zhurnal materialovedeniya*, (33), 5111–5118. (In Russ.).
12. Makdonal'd, K.A. & Nortvud, D.O. (1995). Eksperimental'nye izmereniya skorosti diffuzii khlorid-ionov s ispol'zovaniem dvukhsravnitel'noi diffuzionnoi yacheiki: efekty materiala i testovykh variblov. *Issledovanie tsementa i betona*, (25), 1407–1416. (In Russ.).
13. Buenfel'd, N.R. & Chzhazhan, I.Z. (1998). Diffuziya khloridov cherez obraztsy rastvora, obrabotannye poverkhnost'yu. *Issledovanie tsementa i betona*, (28), 665–674. (In Russ.).
14. Iokhannesson, B. & Utgenannt, P. (2001). Mikrostrukturnye izmeneniya, vyzvannye karbonizatsiei tsementnogo rastvora. *Issledovanie tsementa i betona*, (31), 925–931. (In Russ.).
15. Ngala, V.T. & Peidzh, K.L. (1997). Vliyanie karbonizatsii na strukturu por i diffuzionnye svoistva gidratirovannykh past. *Issledovanie tsementa i betona*, (27), 995–1007. (In Russ.).
16. Fan, Y.Kh., Chzhazhan, Y.T. & Shneider, U.S. (2005). Vliyanie karbonizatsii na mikrostrukтуру zatverdevshei tsementnoi pasty i rastvora. *Zhurnal Khokhaitskogo universiteta (estestvennye nauki)*, 33 (1), 104–107. (In Chinese).
17. Leonovich, S.N. (2001). Algoritim rascheta dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksii pri khloridnoi agressii. In N.P. Bleshchik (Eds.), A.A. Borisevich (Eds.) & T.M. Petsol'd (Eds.) *Perspektivy razvitiya novykh tekhnologii v stroitel'stve i podgotovke kadrov Respubliki Belarus'*: sb. tr. VII Mezhdunar. nauch.-metod. seminar (432–434). Brest: BrGTU. (In Russ.).
18. Leonovich, S.N. (2001). Veroyatnostnaya otsenka korrozii armatury v sushchestvuyushchikh zhelezobetonnykh konstruksiyakh pri khloridnoi agressii. In N.P. Bleshchik (Eds.), A.A. Borisevich (Eds.) & T.M. Petsol'd (Eds.) *Perspektivy razvitiya novykh tekhnologii v stroitel'stve i podgotovke kadrov Respubliki Belarus'*: sb. tr. VII Mezhdunar. nauch.-metod. seminar (435–440). Brest: BrGTU. (In Russ.).
19. Leonovich, S.N. & Prasol, A.V. (2013). Zhelezobeton v usloviyakh khloridnoi korrozii: deformirovanie i razrushenie. *Stroitel'nye materialy*, (5), 94–95. (In Russ.).
20. Shalyi, E.E., Leonovich, S.N., Kim, L.V., Rumyantseva, V.E. & Budrevich, N.A. (2018). Sovmestnoe deistvie karbonizatsii i khloridnoi agressii na konstruksionnyi beton: veroyatnostnaya model' [Probabilistic model of the combined effect of carbonization and chloride aggression on structural concrete]. *Vestn. grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 3 (68), 123–131. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-123-131.
21. Shalyi, E.E., Kim, L.V. & Leonovich, S.N. (2018). Zhelezobeton pri vozdeistvii karbonizatsii i khloridnoi agressii: veroyatnostnaya model' rascheta-prognoza sroka sluzhby [Reinforced concrete under influence of carbonization and chloride aggression: probable model of service life calculation]. *Vestn. Belgorodskogo gos. tekhnol. un-ta im. V.G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]*, (6), 5–14. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.12737/article_5b115a5ef027c2.76676320.
22. Shalyi, E.E., Leonovich, S.N. & Kim, L.V. (2019). Degradatsiya zhelezobetonnykh konstruksii morskikh sooruzheniy ot sovmestnogo vozdeistviya karbonizatsii i khloridnoi agressii [Degradation of Reinforced Concrete Structures of Marine Works from the Combined Impact of Carbonation and Chloride Aggression]. *Stroitel'nye materialy*, (5), 67–72. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72.
23. Leonovich, S.N., Shalyi, E.E. & Kim, L.V. (2019). Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction. *Science & Technique*, 18 (14), 284–291. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-284-291.

Поступила 01.11.2022

**PENETRATION OF CHLORIDES INTO CONCRETE:
ANALYSIS OF EXPERIMENTAL STUDIES**

S. LEONOVICH

(Belarusian National Technical University, Minsk)

E. SHALY

(Engineering School of the Far Eastern Federal University, Vladivostok)

D. LITVINOVSKY

(LLC "Injpetsstroyproekt", Minsk)

A. STEPANOVA

(Belarusian State University of Transport, Gomel)

A. ZHURAVSKAYA

(Belarusian National Technical University, Minsk)

V. MALYUK

(OOO "Transstroy-Trest", Korsakov)

Reinforced concrete structures are exposed to an aggressive environment. In this case, combined mechanical and environmental impacts can act simultaneously, and their synergistic effects should be taken into account. This article presents and analyzes the test results on two different types of concrete and mortar. The capillary absorption of carbonized and non-carbonized concrete was determined. The influence of mechanical load on capillary suction has been studied. Moderate compressive load reduces the capillary suction coefficient, while capillary suction is enhanced by higher mechanical loads as microcracks form. The diffusion of chlorides was evaluated using a diffusion cell test. The diffusion coefficient in carbonized concrete is an order of magnitude higher than in non-carbonized concrete.

Keywords: chloride diffusion, capillary absorption, carbonation, combined action.

УДК 624.012.35

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-51-57

ВЛИЯНИЕ СЖАТОЙ ЗОНЫ БЕТОНА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕЗУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

А.А. НЕВДАХ, канд. техн. наук, доц. П.В. КРИВИЦКИЙ
(Брестский государственный технический университет)

В статье анализируется влияние сжатой зоны бетона на сопротивление срезу железобетонных гибких балок. Рассматриваются расчетные модели, по которым в дальнейшем определен вклад сжатой зоны бетона в полное значение сопротивления срезу. Описаны особенности каждой модели, представлены схемы и зависимости для расчета поперечной силы в сжатой зоне бетона. Представлена экспериментальная база данных образцов и выполнен анализ по рассмотренным расчетным моделям. Отмечены варьируемые параметры в базе данных и выполнен анализ по полученным расчетным значениям поперечной силы в сжатой бетонной полосе по моделям. Получены значения вклада поперечной силы в сжатой зоне на количественный вклад в сопротивление срезу и сделаны соответствующие выводы по представленным моделям и рассмотренным параметрам.

Ключевые слова: поперечное усилие, сжатая зона, прочность бетона на сжатие, коэффициент армирования, отношение пролета среза.

Введение. В приопорной зоне железобетонные балочные элементы работают в условиях плоского напряженно-деформированного состояния. Анализ экспериментальных исследований отечественных (Залесов А.С. и др. [2]) и зарубежных авторов (Mphonde A.G.; Ahmad S.H. и Lue D.M.; Leonhardt F. и Walther R.; Angelakos D., Bentz E.C. и Collins M.P.; Pendyala R.S. и Mendis P. [3–7]) показывает, что на сопротивление срезу балок существенное влияние оказывают прочность бетона на сжатие, коэффициент поперечного и продольного армирования, вид бетона, а также геометрические размеры сечения. При этом в наклонном сечении возникает ряд внутренних усилий, воспринимающих перерезывающие силы: в сжатом бетоне над наклонной трещиной, в продольной арматуре, в поперечной арматуре, силы зацепления по берегам трещины¹.

Балочные конструкции, находясь в условиях двухосного напряженного состояния, воспринимают совместное действие нормальных и касательных напряжений. Под воздействием внешней нагрузки в железобетонных конструкциях возникает система наклонных трещин, разделяющих элемент на отдельные блоки. Эти блоки соединены в растянутой зоне продольным армированием и цельной сжатой бетонной полосой над наклонной трещиной.

На сегодняшний день проведены обширные теоретические и экспериментальные исследования для понимания поведения железобетонных конструкций под действием среза. Однако не существует общепринятой теоретической модели, которая сочетала бы точность описания и простоту расчета при проектировании большинства конструкций.

Усилие в сжатом бетоне над наклонной трещиной является одной из определяющих составляющих при нахождении сопротивления срезу элемента. Для оценки этого влияния рассматриваются балочные элементы без поперечного армирования, позволяющие исключить влияние других факторов, таких как усилие в поперечной арматуре, и получить более точную картину распределения усилий.

При этом вклад сжатой зоны бетона в сопротивлении срезу изучен недостаточно. Поэтому в работе рассматривается влияние прочности бетона на сжатие, коэффициента армирования и геометрических размеров на величину поперечного в сжатой зоне бетона.

Характеристика представленных моделей. Модель, предложенная К.Н. Reineck [1], позволяет рассчитывать «гибкие» ($a/d > 2,5$, где a – пролет среза, d – рабочая высота сечения) железобетонные балочные элементы без поперечного армирования. Согласно исследованиям К.Н. Reineck, усилие среза в основном передается в зоне контакта образовавшихся зубчатых элементов за счет трения по берегам трещины и «нагельного эффекта» в продольной арматуре. Автором предполагается простое распределение напряжений трения вдоль трещин и четко описывается результирующее напряженно-деформированное состояние в элементе, которое может быть представлено моделью (рисунок 1).

Данная модель предлагает вертикальное равновесие сил среза, и расчет поперечной силы V_c , воспринимаемой сжатым бетоном над наклонной трещиной, имеет вид [1]:

$$V_c = \frac{2}{3} c \cdot b_w \cdot \tau_n = \frac{2}{3} \frac{c}{z} \cdot V, \quad (1)$$

где $z = d - \frac{c}{3}$ – плечо пары сил;

c – высота сжатой зоны в представленной модели;

V – поперечная сила.

¹ Кривицкий, П.В. Сопротивление срезу предварительно напряженных железобетонных балок с полого отогнутыми канатами : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / П.В. Кривицкий. – Брест, 2016. – 167 л.

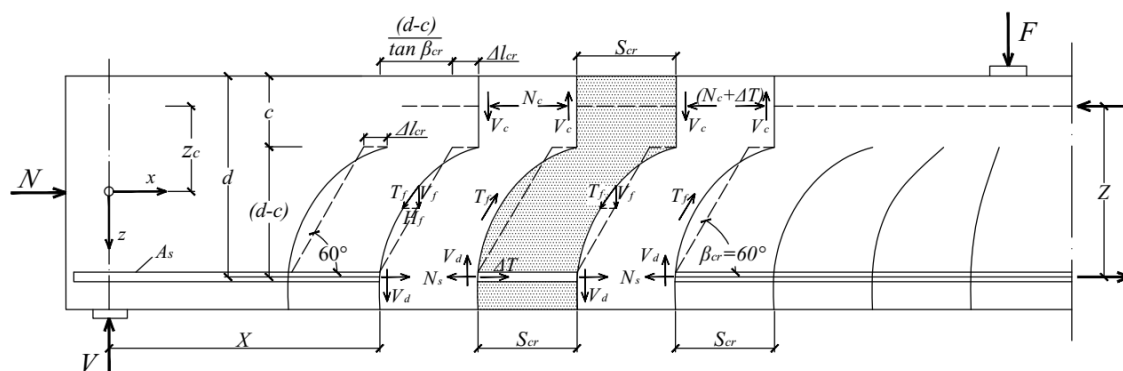


Рисунок 1. – Железобетонная конструкция с «зубчатыми» элементами [1]

Максимальный вклад сжатого бетона в сопротивлении срезу, согласно К.Н. Reineck [1], составляет до 30%.

Коллектив под руководством профессора А.С. Залесова [2] на базе метода предельного равновесия разработал модель, учитывающую совместное сопротивление продольной и поперечной арматуры, сжатой зоны бетона и трения по берегам наклонной трещины. Авторы при анализе проведенных испытаний выделили наличие зон концентраций деформаций бетона и арматуры при раздроблении бетона над наклонной трещиной и предложили диско-связевую систему. В зависимости от формы разрушения, коллектив рассматривает особенности распределения внутренних усилий в наклонной трещине и соответствующие уравнения равновесия.

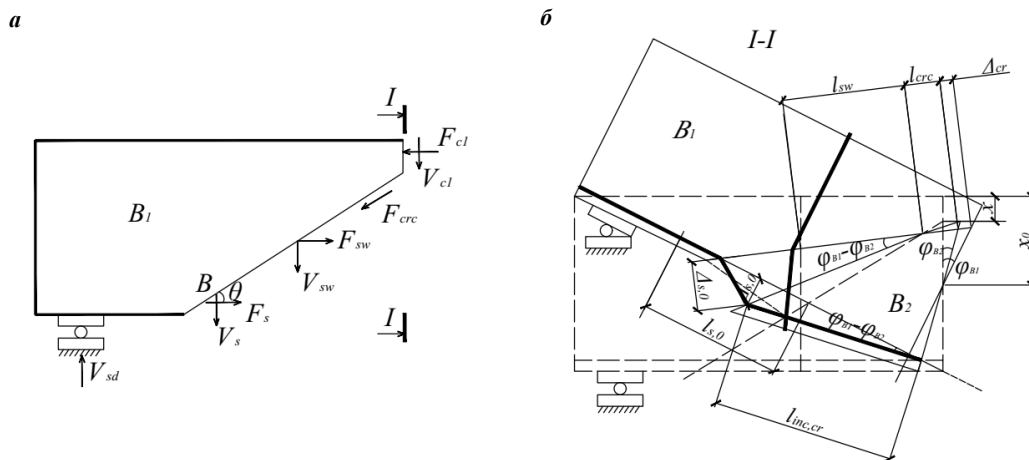
При проверке прочности сжатой зоны бетона над наклонной трещиной (рисунок 2) составляющая вклада бетона сжатой зоны составляет 25–35% от суммы всех составляющих и определяется по следующей зависимости [2]:

$$V_{cd} = 1,5 f_{ctd} \cdot b \cdot x \cdot \omega_1, \quad (2)$$

где f_{ctd} – прочность на осевое растяжение;

x – высота сжатой зоны бетона над трещиной;

ω_1 – коэффициент, отражающий отклонение расчетной эпюры от опытной по форме и значению напряжений.



а – расчетная модель; б – кинематическая схема

Рисунок 2. – Модели предельного равновесия в наклонном сечении при раздроблении бетона [2]

В советских² и национальных³ нормах получил практическое применение метод предельных усилий в расчетном наклонном сечении. Расчет железобетонных элементов на действие поперечной силы (рисунок 3) для обеспечения прочности по наклонной трещине должен производиться по наиболее опасному наклонному сечению.

Поперечное усилие $V_{Rd,ct}$, воспринимаемое элементом без вертикальной и (или) наклонной арматуры⁴, определяется по формуле (3):

$$V_{Rd,ct} = \eta_{c3} \cdot (1 + \eta_f + \eta_N) \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d, \quad (3)$$

² Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур : СНиП 2.03.04-84. – Введ. 01.01.86. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – 60 с.

³ Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-2002. – Введ. 01.07.03. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2003. – 144 с.

⁴ См. сноску 3.

где $\eta_{сз}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида бетона;
 η_f – коэффициент, учитывающий влияние сжатых полок в тавровых и двутавровых элементах,

$$\eta_f = 0,75 \frac{(b'_f - b_w) \cdot h'_f}{b_w \cdot d} \leq 0,5; \quad (4)$$

η_N – коэффициент, учитывающий влияние продольных сил, определяется по формуле:

$$\eta_N = 0,1 \frac{N_{sd}}{f_{ctd} \cdot b_w \cdot d} \leq 0,5. \quad (5)$$

Значение $(1 + \eta_f + \eta_N)$ во всех случаях следует принимать не более 1,5.

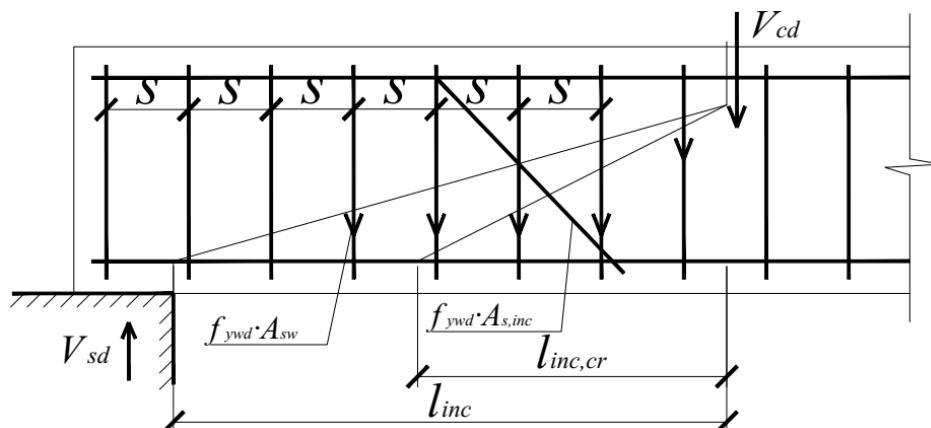


Рисунок 3. – Схема усилий в сечении, наклонном к продольной оси железобетонного элемента, при расчете его по прочности из действия поперечной силы

Анализ расчетных моделей на базе экспериментальных данных. Для определения влияния сжатой зоны бетона на сопротивление срезу была сформирована база на основе экспериментальных исследований A.G. Mphonde [3], S.H. Ahmad и D.M. Lue [4] и F. Leonhardt и R. Walther [5]. Для сравнения выбраны балочные образцы без поперечного армирования со схожими размерами и физико-механическими характеристиками. Данная база была сформирована, чтобы учесть влияние различных факторов (прочность бетона на сжатие, коэффициент продольного армирования, отношение пролета среза) на величину перерезывающего усилия, воспринимаемого конструкцией. В таблице 1 представлены характеристики образцов, экспериментальные значения воспринимаемой поперечной силы и расчетные значения поперечных усилий в сжатой зоне бетона по рассмотренным выше моделям.

Таблица 1. – Размеры и характеристики образцов, экспериментальные значения воспринимаемой поперечной силы и расчетные значения поперечных усилий в сжатой зоне бетона

Образцы	b_w , мм	d , мм	a/d	ρ , %	c , мм	f_c , МПа	V_{exp} , кН	V_{cd1} , кН	V_{cd2} , кН	V_{cd3} , кН
Экспериментальное исследование A.G. Mphonde [3]										
A0-3-3b	152	298	3,6	3,36	161	22,57	64,77	17,51	25,46	19,39
A0-3-3c	152	298	3,6	2,32	148	29,49	66,59	18,73	26,75	22,17
A0-7-3a	152	298	3,6	3,36	132	40,94	81,99	20,15	28,12	26,12
A0-7-3b	152	298	3,6	3,36	127	45,24	82,89	20,53	28,44	27,46
A0-11-3a	152	298	3,6	3,36	102	81,44	89,69	23,26	30,64	36,84
A0-11-3b	152	298	3,6	3,36	102	81,13	89,23	23,20	30,58	36,77
A0-15-3a	152	298	3,6	3,36	98,3	88,41	93,31	23,52	30,77	38,38
A0-15-3c	152	298	3,6	3,36	93,6	99,82	97,84	24,07	31,13	40,79
A0-15-3b	152	298	3,6	3,36	92,9	101,83	100,10	24,18	31,21	41,19
Экспериментальное исследование S.H. Ahmad и D.M. Lue [4]										
A8	127	208	3	1,45	59,5	66,1	48,87	10,87	13,45	23,23
A2	127	203	3	3,14	79,9	66,1	68,84	15,94	18,07	22,67
C2	127	184	3	4,81	85,8	69,9	75,48	16,48	19,95	21,13
Экспериментальное исследование F. Leonhardt и R. Walther [5]										
5г	190	270	3	1,75	114	28,4	77,98	21,15	25,28	29,57
6г	190	270	4	1,75	114	28,4	69,26	21,15	25,28	22,17
7-2	190	278	5	1,75	115	29,7	69,72	21,65	26,08	18,68
8-2	190	274	6	1,75	114	29,9	67,16	21,65	25,94	15,39

Примечание. В таблице использованы следующие обозначения: V_{cd1} – поперечное усилие, воспринимаемое сжатым бетоном по К.Н. Reineck [1], V_{cd2} – по А.С. Залесову [2], V_{cd3} – по нормам⁵.

⁵ См. сноску 3.

Принимая во внимание, что база была сформирована на основе экспериментальных данных различных авторов, каждая группа образцов имеет ряд варьируемых параметров. Рассматривая базу образцов A.G. Mphonde [3], можно отметить, что в данном случае в широком интервале рассматривался такой фактор, как прочность бетона на сжатие (от 22,57 МПа до 101,83 МПа). При этом отношение пролета среза и коэффициент продольного армирования оставался неизменным (исключение составляет образец A0-3-3b с коэффициентом армирования $\rho = 2,32\%$). Все опытные образцы имели размеры 152×337×2438 мм с рабочей высотой сечения 298 мм. Зависимость значений поперечных усилий от прочности бетона на сжатие представлена на рисунке 4.

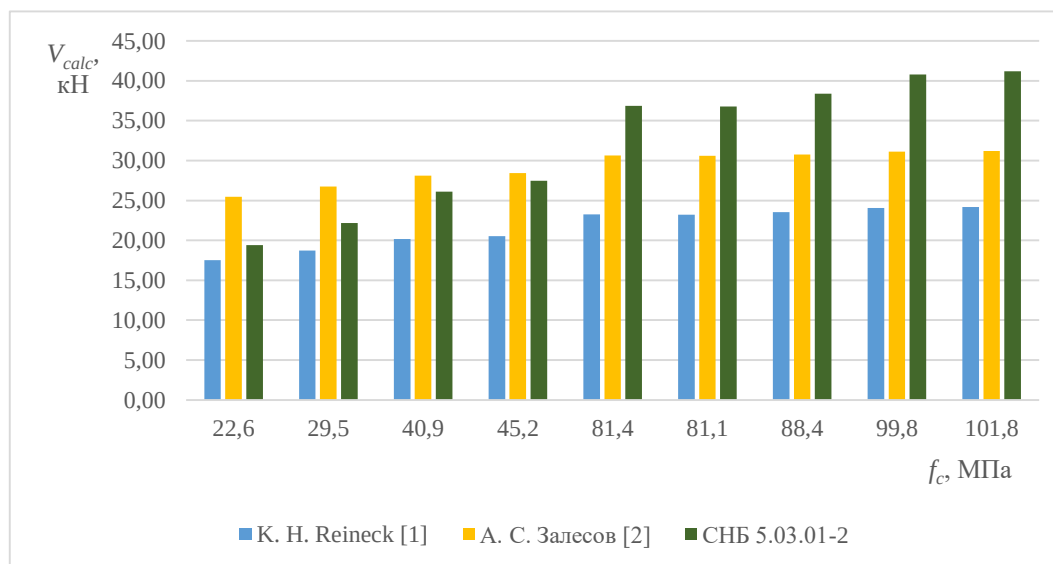


Рисунок 4. – Величина поперечной силы в сжатой зоне бетона в зависимости от прочности бетона на сжатие на основе базы испытаний Mphonde [3]

На рисунке 4 видно, что расчетная модель, согласно нормам⁶, более восприимчива к влиянию прочности бетона на сопротивление срезу, в отличие от других моделей. В таблице 2 приведены граничные расчетные значения по каждой модели, а также вклад полученных результатов в полное (общее) значение поперечной силы, полученной по результатам эксперимента.

Таблица 2. – Сводная ведомость значений на основе базы испытаний Mphonde [3]

Значения	К.Н. Reineck [1]	А.С. Залесов [2]	Нормы ⁷
Расчетное значение поперечной силы V_{calc} , кН			
max	24,18	31,21	41,19
min	17,51	25,46	19,39
middle	21,68	29,23	32,12
Вклад поперечной силы, %			
max	28,1	40,2	41,7
min	24,2	31,2	29,9
middle	25,6	34,7	37,2

В образцах S.H. Ahmad и D.M. Lue [4] варьируемыми значениями выступают коэффициент продольного армирования и рабочая высота сечения с различным вариантом размещения продольного армирования (однорядное и двухрядное расположение арматуры). Опытные балки изготавливались с размерами: ширина 127 мм и высота 254 мм. Используемые в расчете образцы имели разную рабочую высоту сечения при одинаковом отношении пролета среза за счет изменения длины балки. Величина поперечной силы в сжатой зоне бетона в зависимости от коэффициента армирования представлена на рисунке 5.

Из графика видно, что модели К.Н. Reineck [1] и А.С. Залесова [2] значительно зависят от коэффициента продольного армирования. Данное влияние также прослеживается и в процентном отношении вклада поперечной силы в полное воспринимаемое усилие (отклонения в значениях в обоих случаях 1,3%). При этом модель, рассмотренная в нормах⁸, практически не чувствительна к изменению коэффициента армирования.

⁶ См. сноску 3.

⁷ См. сноску 3.

⁸ См. сноску 3.

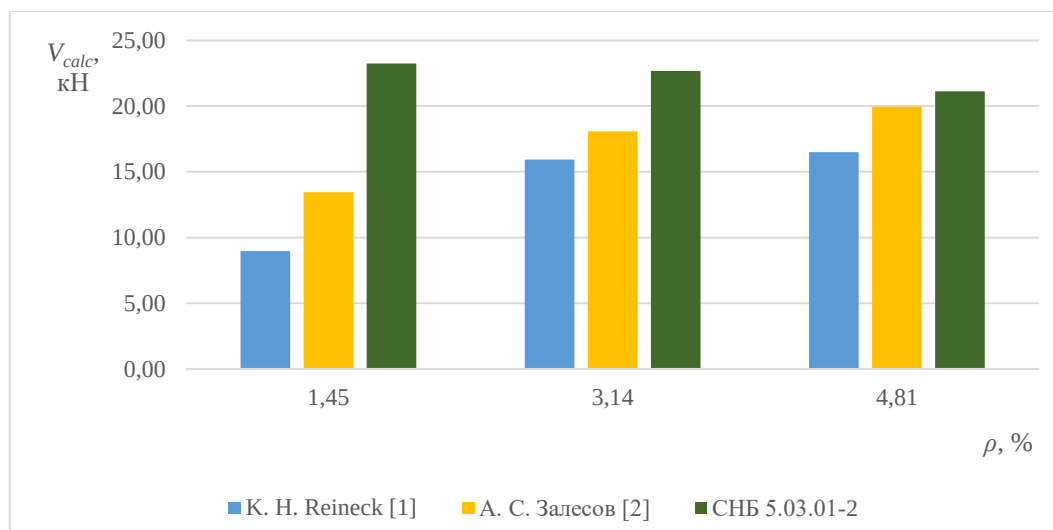


Рисунок 5. – Величина поперечной силы в сжатой зоне бетона в зависимости от коэффициента армирования на основе образцов из базы испытаний Ahmad и Lue [4]

Процентный вклад поперечной силы в сжатом бетоне уменьшается с уменьшением рабочей высоты сечения балки. Сравнение полученных значений представлено в таблице 3.

Таблица 3. – Сводная ведомость значений на основе образцов из базы испытаний Ahmad и Lue [4]

Значения	К.Н. Reineck [1]	А.С. Залесов [2]	Нормы ⁹
Расчетное значение поперечной силы V_{calc} , кН			
max	16,48	19,95	23,23
min	8,98	13,45	21,13
middle	13,80	17,16	22,34
Вклад поперечной силы, %			
max	23,2	27,5	47,5
min	21,8	26,2	28,0
middle	22,4	26,7	36,2

В третьей серии образцов F. Leonhardt и R. Walther [5] фактором вариации выступает значение пролета среза a/d . Балки имели одинаковые геометрические размеры сечения (320×190 мм), коэффициенты армирования и прочность бетона на сжатие. Величина поперечной силы в сжатой зоне бетона в зависимости от отношения пролета среза представлена на рисунке 6.

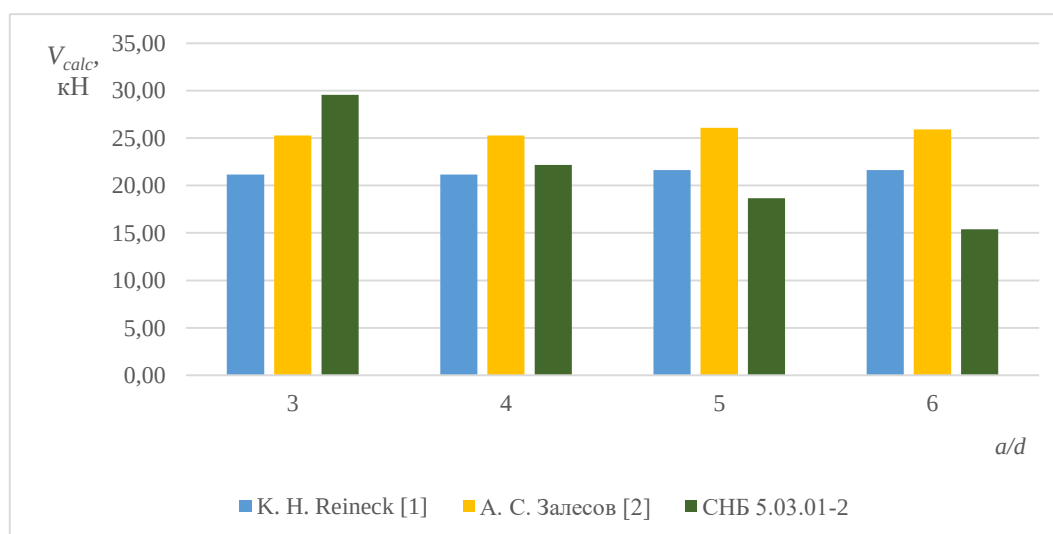


Рисунок 6. – Величина поперечной силы в сжатой зоне бетона в зависимости от отношения пролета среза на основе образцов из базы испытания Leonhardt и Walther [5]

⁹ См. сноску 3.

Как видно из графика, расчетные модели К.Н. Reineck [1] и А.С. Залесова [2] минимально зависимы от изменения пролета среза балки. При этом модель¹⁰ подтверждает положение, что при увеличении отношения пролета среза несущая способность в железобетонных балках без поперечной арматуры уменьшается. Сравнение полученных значений представлено в таблице 4.

Таблица 4. – Сводная ведомость значений на основе образцов из базы испытаний Leonhardt и Walther [6]

Значения	К.Н. Reineck [1]	А.С. Залесов [2]	Нормы ¹¹
Расчетное значение поперечной силы V_{calc} , кН			
max	21,65	26,08	29,57
min	21,15	25,28	15,39
middle	21,40	25,64	21,45
Вклад поперечной силы, %			
max	32,2	38,6	37,9
min	27,1	32,4	22,9
middle	30,2	36,2	29,9

По результатам проведенного анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. В модели К.Н. Reineck [1] в общем случае значения поперечного усилия, воспринимаемого сжатой зоной, составляют от 21,8% до 32,2% от полного значения. Автор подчеркивает, что максимальный вклад поперечного усилия сжатой зоны бетона может быть не более 30%. Данное утверждение подтверждается результатами расчета на базе экспериментальных исследований А.Г. Mphonde [3] и С.Н. Ahmad и D.M. Lue [4]. Для базы F. Leonhardt и R. Walther [5] значения получились больше заявленных К.Н. Reineck (среднее значение 30,2%). Отклонение расчетных значений от экспериментальных составляет 4,0%, 1,3% и 5,1% соответственно.

2. Модель, разработанная авторами [2], оценивает вклад сжатой зоны бетона от 26,2% до 40,2% от полного значения сопротивления срезу. Отклонения значений составляют 9,0%, 1,3% и 6,2% для каждой из рассмотренных баз.

3. Модель¹² имеет большой разброс значений: от 22,9% до 47,5%. При этом проценты отклонения составляют: 11,7%, 19,5% и 15,0%. Модель рассчитывает полную поперечную силу, воспринимаемую элементом без поперечного армирования. Но из-за недостаточного учета влияния всех указанных ранее факторов, значения имеют существенное расхождение с экспериментальными данными.

Заключение. Все рассматриваемые выше в статье параметры оказывают количественное влияние на значение поперечной силы в сжатой зоне бетона. В работе показано, что каждая представленная модель по-своему чувствительна к вариациям заданных параметров: изменение прочности бетона на сжатие влияет во всех рассмотренных моделях; коэффициент продольного армирования оказывает меньше влияния на модель¹³, чем на другие модели; изменение пролета среза имеет минимальное воздействие на модели [1] и [2]. По результатам анализа получено, что вклад сжатой зоны бетона в сопротивление срезу составляет от 21,8% до 47,5%. При этом не исследовано влияние других составляющих сопротивления срезу на величину поперечного усилия в сжатой зоне бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reineck, K.H. Ultimate Shear Force of Structural Concrete Members without Transverse Reinforcement Derived from a Mechanical Model / K.H. Reineck // *ACI Structural Journal*. – 1991. – Vol. 88, № 5. – P. 592–602.
2. Залесов, А.С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил / А.С. Залесов, Ю.А. Климов. – Киев : Будівельник, 1989. – 104 с.
3. Mphonde, A.G. Use of Stirrup Effectiveness in Shear Design of Concrete Beams / A.G. Mphonde // *ACI Structural Journal*. – 1989. – Vol. 86, № 5. – P. 541–545.
4. Ahmad, S.H. Flexure-Shear Interaction of Reinforced High-Strength Concrete Beams / S.H. Ahmad, D.M. Lue // *ACI Structural Journal*. – 1987. – Vol. 84, № 4. – P. 330–341.
5. Leonhardt, F. Schubversuche an Einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne SchubbeWehrung zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit und der Oberen Schubspannungsgrenze / F. Leonhardt, R. Walther. – Berlin : Wilhelm Ernst & Sohn, 1962. – 84 s.
6. Angelakos, D. Effect of Concrete Strength and Minimum Stirrups on Shear Strength of Large Members / D. Angelakos, E.C. Bentz, M.P. Collins // *ACI Structural Journal*. – 2001. – Vol. 98, № 3. – P. 290–300.
7. Pendyala, R.S. Experimental Study on Shear Strength of High-Strength Concrete Beams / R.S. Pendyala, P. Mendis // *ACI Structural Journal*. – 2000. – Vol. 97, № 4. – P. 564–571.

REFERENCES

1. Reineck, K.H. (1991). Ultimate Shear Force of Structural Concrete Members without Transverse Reinforcement Derived from a Mechanical Model. *ACI Structural Journal*, 88 (5), 592–602.

¹⁰ См. сноску 3.

¹¹ См. сноску 3.

¹² См. сноску 3.

¹³ См. сноску 3.

2. Zalesov, A.S. (1989). *Prochnost' zhelezobetonnykh konstruktov pri deistvii poperechnykh sil*. Kiev: Budivel'nik (In Russ.).
3. Mphonde, A.G. (1989). Use of Stirrup Effectiveness in Shear Design of Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 86 (5), 541–545.
4. Ahmad, S.H. & Lue, D.M. (1987). Flexure-Shear Interaction of Reinforced High-Strength Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 84 (4), 330–341.
5. Leonhardt, F. & Walther, R. (1962). *Schubversuche an Einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne SchubbeWehrung zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit und der Oberen Schubspannungsgrenze*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn. (in German).
6. Angelakos, D., Bentz, E.C. & Collins, M.P. (2001). Effect of Concrete Strength and Minimum Stirrups on Shear Strength of Large Members. *ACI Structural Journal*, 98 (3), 290–300.
7. Pendyala, R.S. & Mendis, P. (2000). Experimental Study on Shear Strength of High-Strength Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 97 (4), 564–571.

Поступила 24.09.2022

THE INFLUENCE OF CONCRETE COMPRESSION ZONE ON THE SHEAR RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

A. NEVDAKH, P. KRIVITSKIY
(Brest State Technical University)

The paper analyzes the effect of the compressed zone of concrete on the shear resistance of reinforced concrete flexible beams. The calculation models are considered, by which the contribution of the compressed zone of concrete to the total value of the shear resistance is further determined. The features of each model are described, and schemes and dependencies for calculating the transverse force in the compressed zone of concrete are presented. The experimental database of specimens is presented and the analysis by the considered calculation models is carried out. Varying parameters in the database are marked and the analysis by the obtained calculated values of transverse force in the compressed concrete strip by models is performed. The contribution of the transverse force in the compressed zone to the quantitative contribution to the shear resistance is indicated and appropriate conclusions are drawn on the models presented and the parameters considered.

Keywords: shear force, compressed zone, concrete compressive strength, reinforcement factor, shear span ratio.

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ, НЕ СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ПРОЕКТУ

В.Г. НОВОСЕЛЬЦЕВ¹, Д.В. НОВОСЕЛЬЦЕВА²
(Брестский государственный технический университет)
vgnovoseltsev@yandex.ru¹, dvnovoseltseva@yandex.ru²

При проектировании систем водяного отопления необходимо избежать необоснованного использования лишнего оборудования, превышения диаметров сверх необходимых значений и т.д. В реальности встречаются отклонения от проекта при монтаже, которые приводят к необходимости пересмотра параметров работоспособности системы. Один из случаев – замена трубопроводов одного диаметра на другой. Рассмотрение перспектив работы такой системы отопления на примере является целью данной статьи.

Для примера рассмотрена система водяного отопления в жилом 11-этажном доме г. Бреста (Беларусь) 2019 года постройки. В доме запроектирована поквартирная двухтрубная горизонтальная система водяного отопления с установкой счетчиков учета теплоты для каждой квартиры. При монтаже системы отопления поквартирные ветви системы отопления были смонтированы полиэтиленовыми трубопроводами диаметром 18×2,5 мм и 14×2 мм вместо проектных 25×3,5 мм и 16×2 мм.

Для анализа перспектив функционирования системы отопления выполнены расчеты гидравлических сопротивлений в системе при максимальных расходах теплоносителя, а также соотнесение их с параметрами установленного в индивидуальном тепловом пункте насосного оборудования.

Расчеты показали, что установленного насоса достаточно для работы системы отопления с фактическими диаметрами трубопроводов. Таким образом, фактически примененные диаметры трубопроводов не оказывают отрицательного влияния на работоспособность рассматриваемой системы отопления.

Ключевые слова: система водяного отопления, термостатический клапан, гидравлический расчет, пропускная способность, циркуляционный насос.

Введение. Цель систем отопления – создание теплового комфорта в помещениях при минимуме потребления энергоресурсов. Во время проектирования систем водяного отопления важно избежать необоснованного использования ненужного оборудования, превышения диаметров сверх необходимых значений и т.д. [1; 2]. Однако в реальности случаются отклонения от проекта при монтаже, приводящие к необходимости пересмотра параметров работоспособности системы. Одним из таких случаев является замена трубопроводов одного диаметра на другой. Цель данной статьи – рассмотрение перспектив работы такой системы отопления на примере.

Объект исследования. Для примера была рассмотрена система водяного отопления в жилом 11-этажном доме г. Бреста (Беларусь) 2019 года постройки (рисунок 1). В соответствии с проектом предусмотрены следующие решения системы отопления. В доме запроектирована поквартирная двухтрубная горизонтальная система водяного отопления с установкой счетчиков учета теплоты для каждой квартиры. Схема системы поквартирного отопления представляет собой пару подающих и обратных вертикальных стояков (для каждой из 2 секций здания), к которым поэтажно подключаются циркуляционные кольца отдельных квартир. Системы отопления квартир присоединяются через распределительные коллекторы, расположенные на каждом этаже в распределительных шкафах.

Система теплоснабжения распределительных коллекторов выполняется из стальных труб, система отопления от распределительных коллекторов – из полиэтиленовых труб с антидиффузионной защитой, проложенных скрыто в конструкции пола в защитной гофрированной трубе типа «пешель». На вводе каждого из распределителей установлен автоматический регулятор перепада давления в паре с клапаном-партнером для подсоединения капиллярной трубки. От распределителя на ответвлениях к каждой квартире устанавливается ручной балансировочный клапан, фильтр, теплосчетчик ультразвуковой и запорная арматура. В качестве нагревательных приборов применены стальные панельные радиаторы марки «Лидея компакт». Для регулирования теплоотдачи отопительных приборов используются термостатические клапаны с предварительной настройкой. На обратной подводке к радиаторам установлены запорно-регулирующие клапаны (рисунок 2).

Во время монтажа системы отопления поквартирные ветви системы отопления были смонтированы полиэтиленовыми трубопроводами диаметром 18×2,5 мм и 14×2 мм вместо проектных 25×3,5 мм и 16×2 мм.

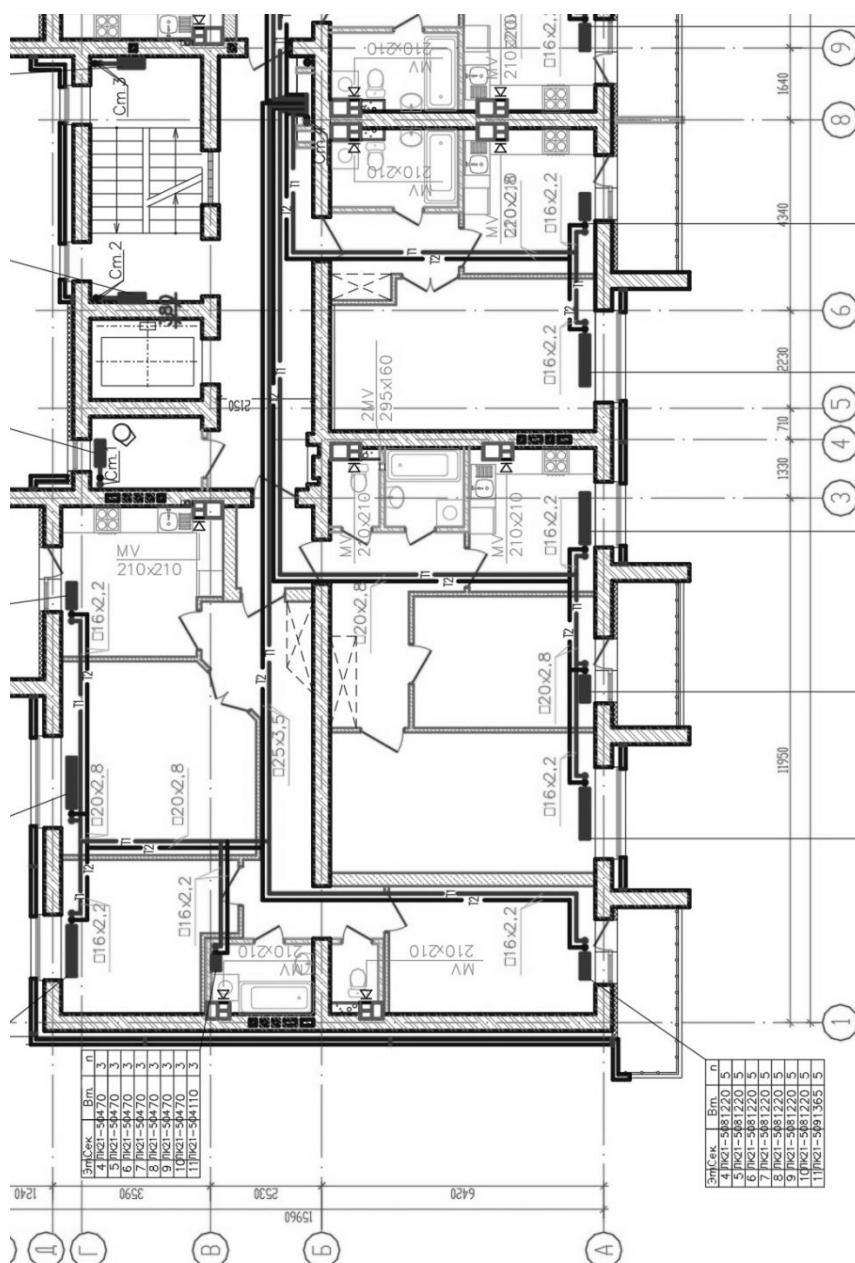


Рисунок 1. – План 11 этажа в осях 1-12 с элементами системы отопления

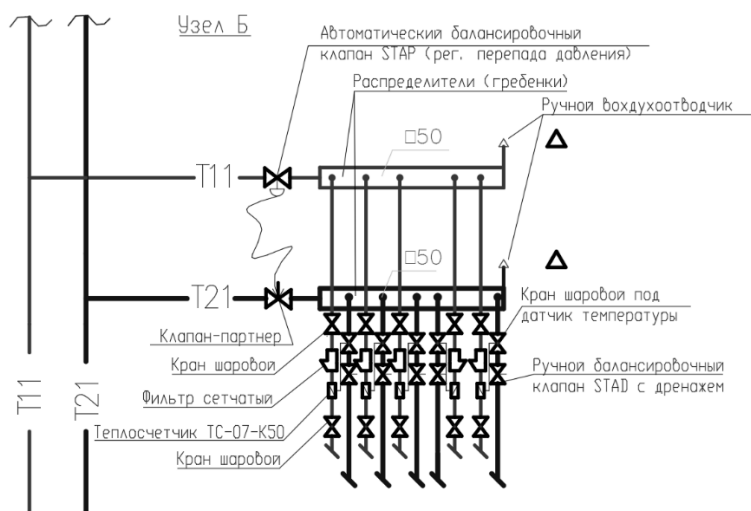


Рисунок 2. – Узел подключения поквартирных систем отопления для одной из секций

Методика выполнения исследований. Чтобы проанализировать перспективы функционирования смонтированной системы отопления, были выполнены расчеты гидравлических сопротивлений в системе при максимальных расходах теплоносителя, а также соотнесение их с параметрами установленного в индивидуальном тепловом пункте насосного оборудования [3].

Определяем расходы воды на участках по формуле:

$$G = \frac{0,86 \cdot Q_{\text{уч}}}{(t_e - t_o)}, \text{ кг/ч}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{уч}}$ – тепловая нагрузка на расчетном участке, Вт;

t_e – расчетная температура воды на входе в систему отопления (по проектным данным 90°C);

t_o – расчетная температура обратной воды на выходе из системы отопления (по проектным данным 70°C).

По расходам воды на участках по таблицам для гидравлического расчета (данные производителей трубопроводов) определяем для принятых диаметров величину удельных потерь давления $R_{\text{уд}}$, Па/м и скорость движения воды V , м/с. Оптимальная расчетная скорость движения воды для полимерных трубопроводов должна определяться по рекомендациям изготовителей трубопроводов, в большинстве случаев скорость составляет до $0,5 \dots 0,7$ м/с для полимерных труб, удельная потеря давления на трение $R_{\text{уд}}$ в среднем $100 \dots 250$ Па/м. Например, по рекомендациям известного производителя полимерных трубопроводов фирмы KAN-therm, за скорость в металлополимерных и полиэтиленовых трубопроводах, проходящих в конструкции пола, следует принимать значения, соответствующие экономичным гидравлическим сопротивлениям $R_{\text{уд}} = 150 \dots 250$ Па/м:

Ø14×2	$v=0,3 \div 0,4$ м/с
Ø16×2	$v=0,35 \div 0,45$ м/с
Ø18×2,5	$v=0,4 \div 0,5$ м/с
Ø20×2,8	$v=0,45 \div 0,6$ м/с
Ø25×3,5	$v=0,5 \div 0,6$ м/с

Определяем потери давления на трение на участках. Потери давления на балансировочных клапанах определяем по номограммам изготовителя или при известном значении пропускной способности элемента k_v по формуле:

$$\Delta P = 0,1 \cdot \left(\frac{G}{k_v} \right)^2, \text{ Па}, \quad (2)$$

где G – расход воды на участке, кг/ч;

k_v – пропускная способность (по каталогу изготовителя), м³/ч.

Все k_v приняты по данным производителей оборудования, марки которого взяты из проектных данных.

В главное циркуляционное кольцо рассматриваемой системы отопления входят потери в термостатическом клапане, ультразвуковом теплосчетчике, ручном балансировочном клапане, автоматическом балансировочном клапане и клапане-партнере. Местные сопротивления, сопротивления отопительного прибора, сопротивления остальных элементов в поквартирном узле и запорно-регулирующего клапана у радиатора учитываем в виде 20% добавки к основным сопротивлениям [4].

Расчет для секции здания в осях 1-12. В качестве главного циркуляционного кольца принят отопительный прибор квартиры верхнего этажа с самой большой протяженностью трубопроводов – комната в осях А-Б, ось 1.

Расчетные тепловые потери комнаты – 1365 Вт, всех помещений квартиры – 5015 Вт. Настройка термостатического клапана рассматриваемого отопительного прибора – 5, марка клапана RA-N, диаметр 15 мм. Настройка ручного балансировочного клапана квартиры – 1,4, марка клапана STAD, диаметр 20 мм. Настройка клапана-партнера в поквартирном узле – 3, марка клапана STAD, диаметр 20 мм. Марка автоматического балансировочного клапана STAR, диаметр 20 мм. Марка теплосчетчика ТС-07 к50, диаметр 15 мм.

Результаты расчетов:

А. В соответствии с проектом.

Сопротивление главного циркуляционного кольца:

1. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 16 мм, длина 19,4 м (подача и обратка), расход теплоносителя 59 кг/ч – удельные потери давления $R_{\text{уд}} = 36$ Па/м, скорость движения воды 0,15 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 0,84 кПа.

2. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 25 мм, длина 36 м (подача и обратка), расход теплоносителя 215 кг/ч – удельные потери давления $R_{\text{уд}} = 47$ Па/м, скорость движения воды 0,24 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 2,03 кПа.

3. Сопротивление термостатического клапана – 2,7 кПа.

4. Сопротивление ручного балансировочного клапана – 4,2 кПа.

5. Сопротивление теплосчетчика – 3,2 кПа.

6. Сопротивление ручного балансировочного клапана (клапана-партнера) и автоматического балансировочного клапана – 16,1 кПа.

7. Сопротивления в магистральных стояках – 4,26 кПа (подача и обратка).

8. Сопротивление теплообменника 20 кПа (проектные данные) и дополнительного оборудования теплового пункта (грязевик, 3 шаровых крана, обратный клапан) – до 5 кПа.

Суммарные сопротивления – 58,33 кПа.

Б. Фактические диаметры трубопроводов.

Сопротивление главного циркуляционного кольца:

1. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 14 мм, длина 19,4 м (подача и обратка), расход теплоносителя 59 кг/ч – удельные потери давления $R_{уд} = 85$ Па/м, скорость движения воды 0,22 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 1,98 кПа.

2. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 18 мм, длина 36 м (подача и обратка), расход теплоносителя 215 кг/ч – удельные потери давления $R_{уд} = 225$ Па/м, скорость движения воды 0,47 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 9,72 кПа.

3. Сопротивление термостатического клапана – 2,7 кПа.

4. Сопротивление ручного балансировочного клапана – 4,2 кПа.

5. Сопротивление теплосчетчика – 3,2 кПа.

6. Сопротивление ручного балансировочного клапана (клапана-партнера) и автоматического балансировочного клапана – 16,1 кПа.

7. Сопротивления в магистральных стояках – 4,26 кПа (подача и обратка).

8. Сопротивление теплообменника 20 кПа (проектные данные) и дополнительного оборудования теплового пункта (грязевик, 3 шаровых крана, обратный клапан) – до 5 кПа.

Суммарные сопротивления – 67,16 кПа.

Расчет для секции здания в осях 12-20. В качестве примера выполнен расчет для квартиры в осях 12-15 на верхнем этаже, кольцо принято через отопительный прибор комнаты в осях А-Б, ось 12.

Расчетные тепловые потери комнаты – 1115 Вт, всех помещений квартиры – 4470 Вт. Настройка термостатического клапана рассматриваемого отопительного прибора – 4, марка клапана RA-N, диаметр 15 мм. Настройка ручного балансировочного клапана квартиры – 1,1, марка клапана STAD, диаметр 20 мм. Настройка клапана-партнера в поквартирном узле – 3,4, марка клапана STAD, диаметр 20 мм. Марка автоматического балансировочного клапана STAR, диаметр 20 мм. Марка теплосчетчика TC-07 к50, диаметр 15 мм.

Результаты расчетов:

А. В соответствии с проектом.

Сопротивление циркуляционного кольца:

1. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 16 мм, длина 17,4 м (подача и обратка), расход теплоносителя 49 кг/ч – удельные потери давления $R_{уд} = 26$ Па/м, скорость движения воды 0,12 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 0,54 кПа.

2. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 25 мм, длина 19 м (подача и обратка), расход теплоносителя 192 кг/ч – удельные потери давления $R_{уд} = 39$ Па/м, скорость движения воды 0,21 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 0,89 кПа.

3. Сопротивление термостатического клапана – 1,9 кПа.

4. Сопротивление ручного балансировочного клапана – 5,76 кПа.

5. Сопротивление теплосчетчика – 3,2 кПа.

6. Сопротивление ручного балансировочного клапана (клапана-партнера) и автоматического балансировочного клапана – 13,1 кПа.

7. Сопротивления в магистральных стояках – 4,2 кПа (подача и обратка).

8. Сопротивление теплообменника 20 кПа (проектные данные) и дополнительного оборудования теплового пункта (грязевик, 3 шаровых крана, обратный клапан) – до 5 кПа.

Суммарные сопротивления – 51,39 кПа.

Б. Фактические диаметры трубопроводов.

Сопротивление циркуляционного кольца:

1. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 16 мм, длина 17,4 м (подача и обратка), расход теплоносителя 49 кг/ч – удельные потери давления $R_{уд} = 60$ Па/м, скорость движения воды 0,21 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 1,25 кПа.

2. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 25 мм, длина 19 м (подача и обратка), расход теплоносителя 192 кг/ч – удельные потери давления $R_{уд} = 186$ Па/м, скорость движения воды 0,41 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 4,24 кПа.

3. Сопротивление термостатического клапана – 1,9 кПа.

4. Сопротивление ручного балансировочного клапана – 5,76 кПа.

5. Сопротивление теплосчетчика – 3,2 кПа.

6. Сопротивление ручного балансировочного клапана (клапана-партнера) и автоматического балансировочного клапана – 13,1 кПа.

7. Сопротивления в магистральных стояках – 4,2 кПа (подача и обратка).

8. Сопротивление теплообменника 20 кПа (проектные данные) и дополнительного оборудования теплового пункта (грязевик, 3 шаровых крана, обратный клапан) – до 5 кПа.

Суммарные сопротивления – 58,65 кПа.

Результаты и обсуждение. Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы.

Для секции здания в осях 1-12 суммарные гидравлические сопротивления в системе отопления составляют 58,33 кПа для проектных диаметров трубопроводов в квартире (16 и 25 мм) и 67,16 кПа для фактических трубопроводов (14 и 18 мм). Потери давления в остальных частях системы левой секции здания (циркуляционных кольцах) равны либо менее указанных.

Для секции здания в осях 12-20 суммарные гидравлические сопротивления в системе отопления составляют 51,39 кПа для проектных диаметров трубопроводов в квартире (16 и 25 мм) и 58,65 кПа для фактических трубопроводов (14 и 18 мм). Потери давления в остальных частях системы правой секции здания (циркуляционных кольцах) равны либо менее указанных.

Для анализа функционирования системы отопления при максимальных расходах теплоносителя рассмотрим параметры установленного в индивидуальном тепловом пункте насосного оборудования.

В качестве циркуляционного насоса в индивидуальном тепловом пункте применен насос Wilo Stratos D 65/1-12. Его характеристики показаны на рисунке 3.

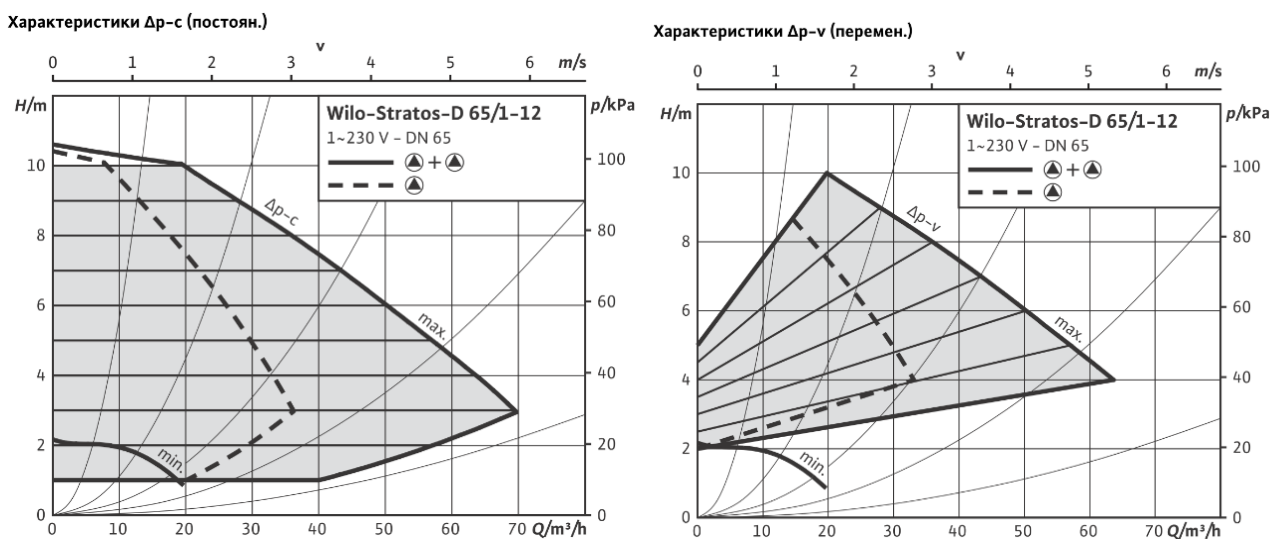


Рисунок 3. – Характеристики насоса Wilo Stratos D 65/1-12

Максимальный расчетный расход системы отопления здания составляет 14,2 м³/ч (проектные данные). Насос Wilo Stratos D 65/1-12 обеспечит циркуляцию такого расхода (при работе одного насоса в односкоростном режиме или энергосберегающем режиме), создавая напор 8,5 м, то есть при сопротивлении системы 85 кПа, что выше максимального расчетного значения 67,16 кПа. Таким образом, установленного насоса достаточно для работы системы отопления с фактическими диаметрами трубопроводов.

Также следует отметить, что фактически примененные диаметры трубопроводов в большей степени согласуются с рекомендациями производителей полимерных трубопроводов по параметрам оптимальной расчетной скорости движения воды и удельной потери давления на трение, чем проектные значения.

Заключение. При монтаже системы водяного отопления рассматриваемого дома поквартирные ветви системы отопления были смонтированы полиэтиленовыми трубопроводами диаметром 18×2,5 мм и 14×2 мм вместо проектных 25×3,5 мм и 16×2 мм. Как показали расчеты, установленного насоса достаточно для работы системы отопления с фактическими диаметрами трубопроводов.

Таким образом, фактически примененные диаметры трубопроводов не оказывают отрицательного влияния на работоспособность рассматриваемой системы отопления. Однако следует отметить, что уменьшение диаметров трубопроводов приводит к увеличению гидравлических сопротивлений и, как следствие, уменьшению авторитетов термостатических клапанов.

ЛИТЕРАТУРА

- Navaselsau, U. Energy efficiency of multi-apartment residential houses with individual heat supply / U. Navaselsau, D. Navaselsava, M. Shenogin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 896. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012057.
- Navaselsau, U. Energy consumption of modern residential houses of the same energy efficient classes / U. Navaselsau, V. Khaletski, V. Melnikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 896. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012056.
- Пырков, В.В. Гидравлическое регулирование систем отопления и охлаждения. Теория и практика / В.В. Пырков. – 2-е изд., доп. – Киев : Такі справи, 2010. – 304 с.
- Китиков, В.О. Метод гидравлического расчета энергоэффективных систем тепло- и холодоснабжения зданий / В.О. Китиков, В.В. Покотилов // Энергоэффективность. – 2019. – № 11. – С. 24–29.

REFERENCES

1. Navaseltsau, U., Navaseltava, D. & Shenogin, M. (2020). Energy efficiency of multi-apartment residential houses with individual heat supply. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, (896). DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012057.
2. Navaseltsau, U., Khaletski, V. & Melnikov, V. (2020). Energy consumption of modern residential houses of the same energy efficient classes. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, (896). DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012056.
3. Pyrkov, V.V. (2010). *Gidravlichesкое regulirovanie sistem otopeniya i okhlazhdeniya. Teoriya i praktika*. Kiev: Taki spravi. (In Russ.).
4. Kitikov, V.O. & Pokotilov, V.V. (2019). Metod gidravlicheskogo rascheta energoeffektivnykh sistem teplo- i kholodosnabzheniya zdaniy. *Energoeffektivnost'*, (11), 24–29. (In Russ.).

Поступила 26.10.2022

**ASSESSMENT OF THE OPERABILITY OF THE WATER HEATING SYSTEM,
NOT RELEVANT TO THE PROJECT**

U. NAVASELTSAU, D. NAVASELTSAVA
(Brest State Technical University)

When designing water heating systems, it is necessary to avoid unjustified use of excess equipment, exceeding diameters beyond the required values, etc. In reality, there are deviations from the project during installation, which lead to the need to revise the parameters of the system's operability. One of the cases is the replacement of pipelines of one diameter with another. Consideration of the prospects for the operation of such a heating system by example is the purpose of this work.

For example, the water heating system in a residential 11-storey building in Brest (Belarus) built in 2019 is considered. The house has designed an apartment-by-apartment two-pipe horizontal water heating system with the installation of heat meters for each apartment. When installing the heating system, the apartment-by-apartment branches of the heating system were mounted with polyethylene pipelines with a diameter of $18 \times 2,5$ mm and 14×2 mm instead of the design $25 \times 3,5$ mm and 16×2 mm.

To analyze the prospects for the functioning of the designed heating system, calculations of hydraulic resistances in the system at maximum coolant flow rates were performed, as well as their correlation with the parameters of the pumping equipment installed in the individual heating point.

Calculations have shown that the installed pump is sufficient for the operation of the heating system with the actual diameters of the pipelines. Thus, the actually applied pipe diameters do not adversely affect the performance of the heating system in question.

Keywords: water heating system, thermostatic valve, hydraulic calculation, throughput, circulation pump.

УДК 628.112

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-64-70

ЗАКАЧКА ВОДЫ В ПОДЗЕМНЫЙ ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ СКВАЖИНЫ ИЗ ПЫЛЕВИДНОГО И СРЕДНЕ-МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ПЕСКА ПРИ МАЛОМ ВОДОПОТРЕБЛЕНИИ

Е.И. РАШКЕВИЧ¹

*(Витебское областное коммунальное унитарное предприятие
водопроводно-канализационного хозяйства «Витебскобводоканал»)*

канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО²

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

selenapuko@gmail.com¹, yuvd46@mail.ru²

В статье описываются основные операции по закачке воды в подземный водоносный пласт скважины. Авторами проведена оценка закачки воды в подземный пласт из пылевидного и мелкозернистого песка при малом водопотреблении населенного пункта в Витебской области.

Ключевые слова: характеристика скважины и водоносного слоя, качество воды, особенности закачки воды в подземный пласт.

Введение. Подземные воды на территории Беларуси приурочены к породам кристаллического фундамента и к осадочным образованиям верхнего протерозоя-кайнозоя. Единицами региональных гидрогеологических подразделений являются горизонты и комплексы [1; 2; 4].

Водоносным горизонтом, или аквифером, называют один или несколько контактирующих между собой слоев горных пород (преимущественно, осадочных), имеющих сходный состав и происхождение, с высокими показателями водопроницаемости. Для систем водоснабжения водоносным горизонтом считают зону под поверхностью земли, которая способна обеспечить добычу воды в масштабах, имеющих практическое (экономическое, стратегическое, промышленное и т.д.) значение.

В соответствии с геологическим строением, стратиграфическим расчленением, литологическим составом пород, их фильтрационными свойствами и характером водоносности выделены: водоносные, слабоводоносные локально водоносные, слабоводоносные, водоупорные локально водоносные горизонты и комплексы.

Аллювиальные горизонты относятся к гидрогеологическим подразделениям четвертичного возраста и почти сплошным чехлом покрывают всю территорию Беларуси, причем водовмещающими породами служат водно-ледниковые отложения верхнечетвертичного поозерского образования. Породы представлены преимущественно песками различной зернистости с большим или меньшим содержанием гравийно-галечного материала, пылевато-глинистых примесей, с прослоями и линзами супесей, суглинков и глин, а также уплотненными меловыми и доломитовыми образованиями [4].

В рыхлых породах вода накапливается в порах между частицами зернистого материала, а уплотненных – в полостях (кавернах) и трещинах или карстах.

В гидрогеологии водоносные слои делят по типу составляющих горных пород [5]. К ним относятся:

- аллювий, представляющий собой несцементированные (зернистые) осадочные породы, которые возникают в результате отложений в водных протоках (песок, галька, гравий, ил);

- ледниковые отложения – неуплотненные пласты горных пород, образовавшиеся и перемещавшиеся при движении ледников;

- уплотненные отложения – пласты осадочных пород, подвергающиеся давлению верхних слоев;

- метаморфические (трещиноватые) вулканические горные породы.

В последние годы динамика развития водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) Витебской области направлена на решение вопросов улучшения надлежащего качества воды со снижением затрат на оказание услуг.

С этой точки зрения целесообразно рассмотреть вопрос применения метода подготовки воды непосредственно в водоносном пласте скважин, который пока мало изучен в Республике Беларусь [3], что является *актуальной и значимой* задачей.

Технология внутрипластового удаления железа, марганца и некоторых органических соединений известна уже более 100 лет. В настоящий момент за рубежом, в том числе в России, в системах водоснабжения работают свыше 250 установок внутрипластовой очистки воды производительностью 0,5–90 тыс. м³/сут^{1,2} [7].

Эффективность данного метода оценивается исходя из минералого-литографического состава водоносных слоев, строения этих горизонтов, а также химического состава подземных вод и производительности системы водоснабжения. Для определенного состава исходных подземных вод этот метод (in-situ) может быть проще и дешевле

¹ Коммунар, Г.М. Внутрипластовая очистка подземных вод для целей водоснабжения : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.04 / Г.М. Коммунар. – М., 1987. – 469 л.

² Методические рекомендации по опытно-технологическим исследованиям условий обезжелезивания и деманганации подземных вод в водоносном горизонте / сост. В.В. Кулаков, Б.С. Архипов, С.А. Козлов ; науч.-техн. центр «Дальгеоцентр». – Хабаровск, 1999. – 60 с.

в реализации и эксплуатации, чем более распространенное удаление загрязнений непосредственно на станциях и установках водоподготовки наземного расположения (ex-situ)³ [6].

Сущность метода заключается в осуществлении процессов удаления загрязнений непосредственно в водоносном горизонте (слое) путем циклической закачки воды, предварительно обогащенной кислородом, для создания окислительной зоны вокруг эксплуатационной скважины. Следует отметить, что его применение ограничено гидрогеологическими особенностями подземных слоев, которые должны быть достаточно пористыми для надлежащего насыщения воды кислородом. При этом используется многоскважинная система, состоящая отдельно из поглощающих и эксплуатационных скважин, но которая также возможна и в условиях двух работающих скважин.

Стадия закачки воды непосредственно в подземный водоносный пласт является основной, от которой зависит весь последующий процесс удаления железа. Желательно, чтобы вода для ее закачки в пласт соответствовала требованиям СанПиН 10.124-99 РБ и содержание растворенного кислорода в ней составляло 10–12 мгО₂/дм³.

Обогащение воды, закачиваемой в подземный слой, кислородом воздуха рекомендуется выполнять с помощью эжектора⁴. При необходимости производят удаление растворенных газов из воды, подготовленной для введения в водоносный пласт, тогда может использоваться дегазатор, рассчитываемый на продолжительность пребывания в нем воды от 3 до 5 мин.

После закачки воды в пласт и закрепления кислорода в водоносном слое производится ее подача из скважины в водопроводную сеть.

Объект исследований. Для проведения исследований по закачке воды в подземный водоносный пласт был определен малый населенный пункт в Докшицком районе Витебской области. Система водоснабжения принята централизованная, состоящая из водозабора, регулирующей емкости (водонапорная башня) и разводящей тупиковой водопроводной сети. Суточное водопотребление малого населенного пункта составляет до 50 м³, максимальный часовой расход – 6 м³/ч.

Водозабор состоит из двух скважин: «старой» – № 1 (была пробурена в 1994 г.) и «новой» – № 2 (2021 г.), хотя и разной глубины (29,6 и 37,8 м соответственно), но с единым водоносным слоем. Расстояние между ними составляет 12 м. Скважины имеют несовершенный характер погружения и работают в переменном режиме.

Конструкция фильтров скважин: проволочная, высота 5 м. В скважине № 2 предусмотрена гравийная обсыпка фильтра фракцией 1...1,8 мм, интервал с 10...38 м. Дебет скважин при понижении уровня воды в них на 9,5 м составляет 10 м³/ч. В скважинах установлены насосы типа Wilo номинальным расходом 5 м³/ч с напором 80 м на глубину от поверхности земли 30 м. Вода в водонапорную башню и далее в сеть может подаваться из любой скважины с расходом до 8 м³/ч.

Показатели среднего состава подземной воды в скважинах представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристика подземной воды скважин № 1 и № 2*

Наименование показателей	Значение показателей	
	Скважина № 1	Скважина № 2
Запах (ПДК при 20°C = 2 балла)	3	3
Привкус (ПДК при 20°C = 2 балла)	3 (железистый)	3 (железистый)
Цветность (ПДК = 20 град.)	8,1	9,2
Мутность (ПДК = 1,5 мг/дм ³)	4,5	4,5
Величина pH (ПДК в пределах 6-9)	7,5-7,6	7,55-7,68
Величина Eh, мВ	74	65
Минерализация общая (ПДК = 1000 мг/дм ³)	480	460
Жесткость общая Ж _о (ПДК = 7 мг-экв/дм ³)	7,0	7,0
Окисляемость перманганатная (ПДК = 5,0 мгО ₂ /дм ³)	1,6	1,6
Хлориды Cl ⁻ (ПДК = 350 мг/дм ³)	67,42	62,11
Сульфаты SO ₄ ²⁻ (ПДК = 500 мг/дм ³)	51,58	50,80
Железо Fe общее (ПДК = 0,3 мг/дм ³)	1,5-2,9	2,5-3,1
Марганец Mn ²⁺ (ПДК = 0,1 мг/дм ³)	0,11	0,11
Натрий Na ⁺ (ПДК = 200 мг/дм ³)	15,25	15,00
Калий K ⁺ (ПДК = 20 мг/дм ³)	1,26	0,96
Аммиак NH ₄ ⁺ (ПДК = 2,0 мг/дм ³)	0,2-0,3	0,2-0,3
Нитриты NO ₂ ⁻ (ПДК = 2,0 мг/дм ³)	≤0,2	≤0,2
Нитраты NO ₃ ⁻ (ПДК = 45 мг/дм ³)	≤0,2	≤0,2
Сероводород H ₂ S (ПДК = 0,05 мг/дм ³)	отсутствует	отсутствует

Примечание. *Анализы представлены химической лабораторией «Докшицыводоканал». Аттестат соответствия аккредитации № ВУ/112.2.5150. Также использовались тестовые приборы: на общее железо фотометр Milwaukee MW14, на аммоний – Ammonium Test colorimetric, 0,2-8,0 mg/l (NH₄⁺), кислородометр Hanna HI 9142, pH-метр типа pH-061 и Eh-метр типа ORP-969.

³ Rott, U. Residue-free Removal of Arsenic, Iron, Manganese, Ammonia, Nitrate and Colour from Groundwater / U. Rott, C. Meyer // Innovations in Conventional and Advanced Water Treatment Processes : Conference Proceedings, Amsterdam, 26–29 Sept. 2000. – P. 8–14.

⁴ Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы Республики Беларусь : СН 4.01.01-2019. – Введ. 31.10.19. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 73 с.

Основной скважиной, для которой осуществляется закачка воды в водоносный пласт, определена скважина № 2. Гидрогеологический разрез этой скважины представлен на рисунке 1.

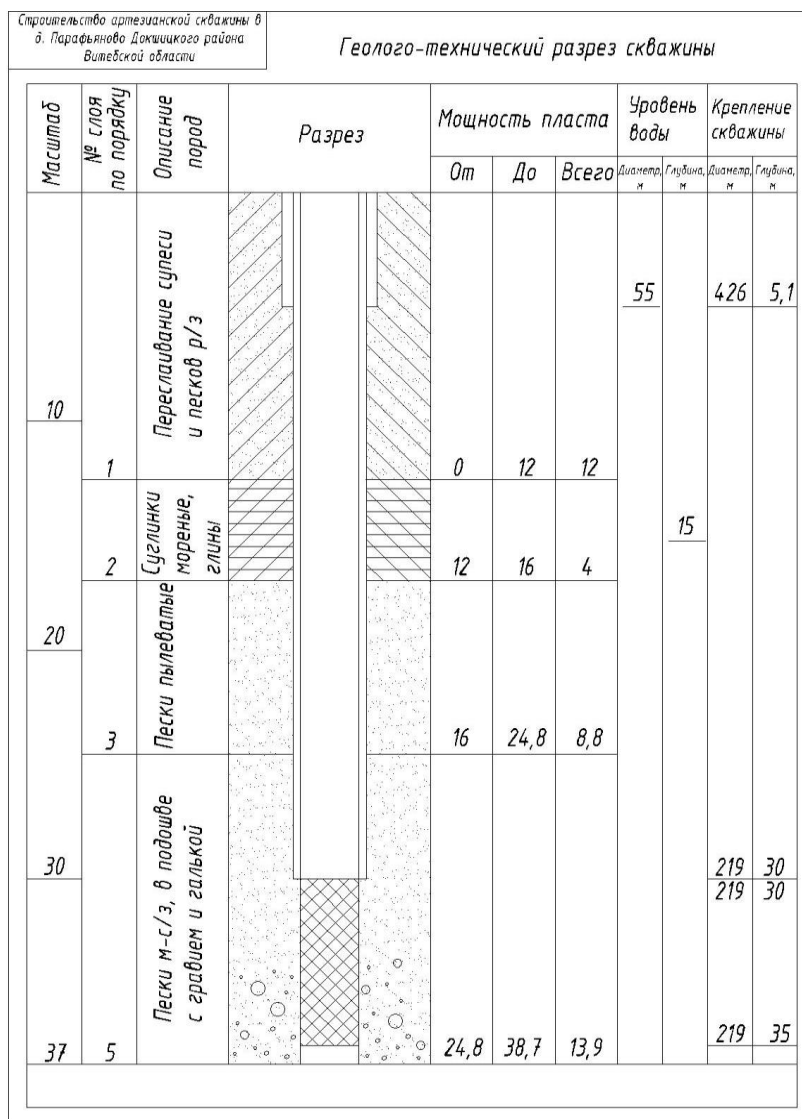


Рисунок 1. – Гидрогеологический разрез скважины № 2

Анализ гидрогеологического разреза скважины № 2 свидетельствует о наличии верхнего водоупорного слоя из глины (12–16 м ниже уровня земли) и нижнего водоносного горизонта, состоящего из двух слоев. Песок пылевидный коричневый, влажный, плотный (толщина слоя от 16,0 до 24,8 м) – 8,8 м. Песок мелко-среднезернистый (от 24,8 до 38,7 м) – 13,9 м. Водоносные слои сообщаются друг с другом. Общая высота составляет 22,7 м.

Характеристика водоносных слоев представлена ниже.

Песок пылевидный, размер зерен менее 0,1 мм, пористость порядка 25–30%, плотность 17,8–10,3 кН/м³, по составу полиминеральный кварцево-полевошпатовый (кварц – 50–90%, полевые шпаты – 50–10%). Коэффициент фильтрации менее 0,5–1 м/сут, проницаемости – 0,5...1,16 Дарси (физическая величина, которая характеризует способность вещества пропускать жидкости и газы).

Песок мелкозернистый светло-серый, влажный, рыхлый, водоносный. Размер зерен составляет 0,25–0,1 мм, пористость порядка 30–35% (выражаясь языком обывателя, «чуть крупнее, чем могильный песок»). По составу кварцево-полевошпатовый. Коэффициент фильтрации песка варьируется в пределах от 1–5 м/сут, а проницаемости находится в пределах 1,16...11,6 Дарси.

Песок среднезернистый. Размер зерен составляет 0,5–0,25 мм (выражаясь языком обывателя, «обычный песок (речной)»), плотность 17,8–10,3 кН/м³. Состав песка, скорее всего, кварцево-полевошпатовый, коэффициент фильтрации песка варьируется в пределах от 5–20 м/сут. Коэффициент проницаемости находится в пределах 11,6–29 Дарси, пористость – 30–35%.

При проведении наблюдений на скважине (производительность, разность уровней) можно будет более точно определить данные показатели.

Экспериментальная часть. Закачка воды в пласт «новой» скважины № 2 производится из существующей «старой» № 1. Насыщение воды воздухом производилось с помощью эжектора на производительность до 5 м³/ч. Технологическая схема представлена на рисунке 2.

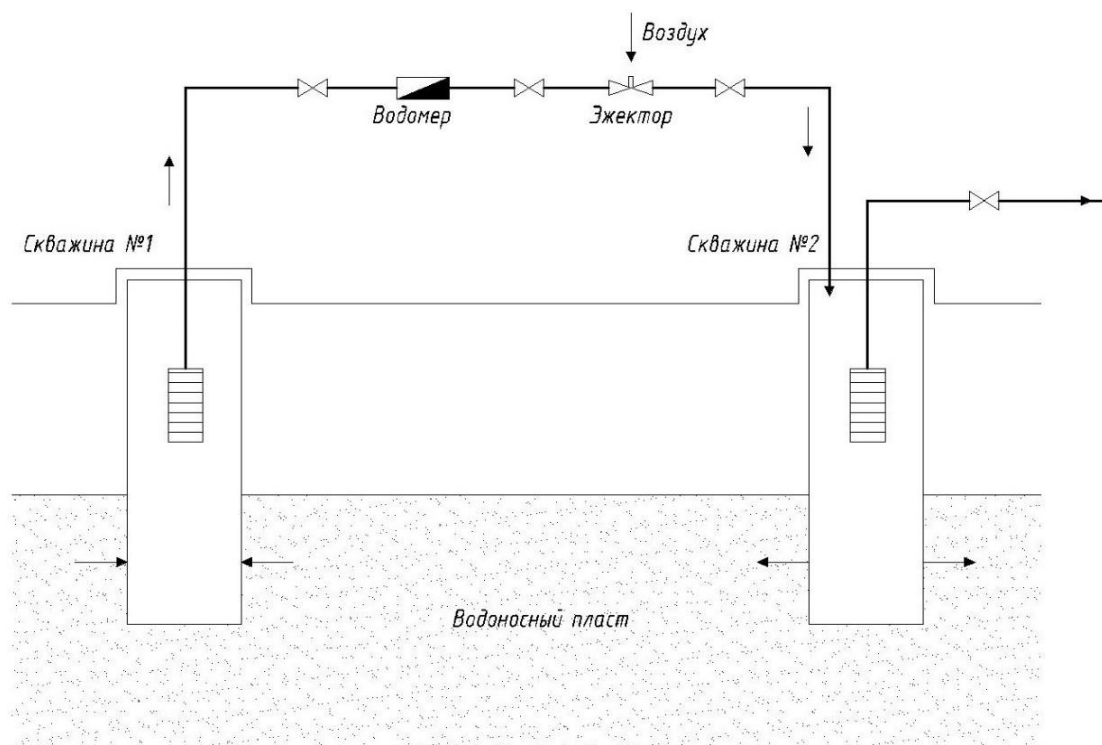


Рисунок 2. – Технологическая схема закачки воды от скважины № 1 («старой») в водоносный пласт скважины № 2 («новой»)

Основными величинами эксплуатации скважины являются объемы воды на закачку воды W_z и дальнейшую ее откачку W_{om} в систему водоснабжения⁵ [3; 6]. При этом:

$$W_z = Q_z \cdot t_z, \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$W_{om} = Q_{om} \cdot t_{om}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где Q_z и Q_{om} – расходы воды, пошедшие на ее закачку в водовмещающий пласт и откачку в систему водоснабжения рассматриваемого объекта, м³/ч;

t_z и t_{om} – продолжительность подачи воды, пошедшей на ее закачку в водовмещающий пласт и откачку в систему водоснабжения рассматриваемого объекта, ч.

Исходя из конструктивных особенностей скважины и ее параметров, по определению этих величин, можно выполнить предварительные расчеты⁶ [6], но с обязательным последующим их уточнением при проведении инженерных изысканий в период ее эксплуатации.

При этом надо учитывать наличие избыточного давления на устье скважины, необходимого для задавливания воды в пласт, которое зависит, прежде всего, от характеристики водоносного слоя. С достижением максимальной величины избыточного давления можно определить возможный объем закачки, который должен быть $W_z \leq W_{om}$, иначе применение рассматриваемого метода становится нецелесообразным. Обычно это соотношение составляет 1:(5...80), но может быть и больше.

Пробная закачка показала, что в начальном режиме этой стадии происходит свободный излив воды в скважину № 2 с показанием манометра перед эжектором, равным 0,12 МПа. Было принято решение проводить стадию закачки воды в пласт скважины № 2 до достижения избыточного давления в 0,4 МПа перед эжектором, исходя из параметров работы насоса, установленного в скважине № 1.

Следует отметить, что качество закачиваемой воды в пласт от скважины № 1 не соответствовало СанПиН 10.124-99 РБ (таблица 1), особенно по концентрациям железа и марганца. Концентрация кислорода в воде после эжектора составила порядка 8–10 мгО₂/м³.

⁵ См. сноску 1.

⁶ См. сноску 1.

Первоначально был установлен байпасный режим работы насоса скважины № 2 «на себя» (порядка 5 ч) для получения максимальной концентрации кислорода в воде ее колонн. Далее был включен режим закачки воды от скважины № 1. Учитывая необходимость подачи воды в водопроводную сеть малого населенного пункта, расход воды на закачку воды в пласт, в среднем, составил 2,5 м³/ч.

Установлено, что первые трое суток вода подавалась в скважину после эжектора в свободном режиме ее поступления в оголовок. В последние двое суток установилось избыточное давление на оголовке скважины. Для его снижения периодически открывался вентиль, через который отводились образовавшиеся газы, появился запах слабый болотистый.

На рисунке 3 представлена зависимость роста величины избыточного давления перед эжектором от продолжительности закачки воды в скважину № 2 от скважины № 1. По окончании 5 суток закачка воды в пласт была остановлена. По данным водосчетчика в скважину было закачено порядка 300 м³.



Рисунок 3. – Зависимость роста величины избыточного давления перед эжектором от продолжительности закачки воды в скважину № 2 от скважины № 1

По окончании стадии закачки воды в скважину проводился ее отстой для закрепления водно-растворенного кислорода в водоносном пласте. Продолжительность отстоя обычно принимается не менее 2–4 суток. В данном случае она составила 3 суток (72 ч.). После этого была произведена прокачка воды из скважины № 2 на рельеф местности. Объем прокачки был определен путем контроля за показаниями водосчетчика, концентрации общего железа, величин pH и Eh.

В таблице 2 и на рисунках 4–5 приведены данные по эксперименту прокачки воды из скважины № 2 на рельеф местности. Одновременно производился отвод газов, прежде всего, углекислого, но при этом отмечался более характерный болотный запах воды, что свидетельствует об образовании какой-то части аммиака и сероводорода.

Таблица 2. – Результаты эксперимента по прокачке воды из скважины № 2

Количество откаченной воды из скважины № 2, м ³	Показатели качества воды				Примечание
	Запах, Привкус, баллы	Железо общее, мг/дм ³	pH	Eh, мВ	
0	3 (железистый)	3,08	7,7	65	Приведены показатели воды до закачки в пласт
0,5	5 (болотистый резкий)	4,63	7,63	105	Давление насоса – 0,15 атм. Расход насоса примерно 2,5–3 м ³ /ч
5,0	То же	4,25	7,6	104	Болотный запах не снижается
7,0	4 (болотистый)	3,26	7,7	115	Болотный запах начал быстро снижаться, проявляется железистый
10,5	3 (железистый)	0,7	7,6	125	Еле уловимый запах, болотный практически исчез, проявляется слабый, скорее всего, железистый
15,0	2	0,4	7,6	145	Запах отсутствует
38,0	2	0,35	7,65	145	Запах отсутствует

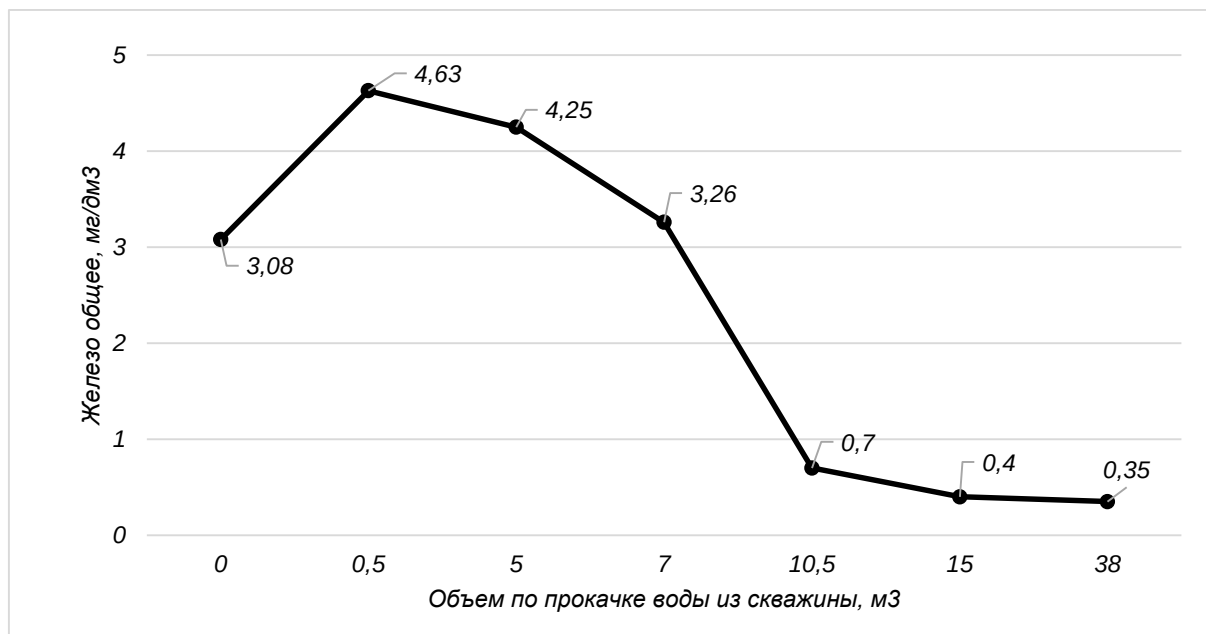


Рисунок 4. – Изменение концентрации железа от объема прокачки воды из скважины № 2 на выброс после ее закачки в пласт

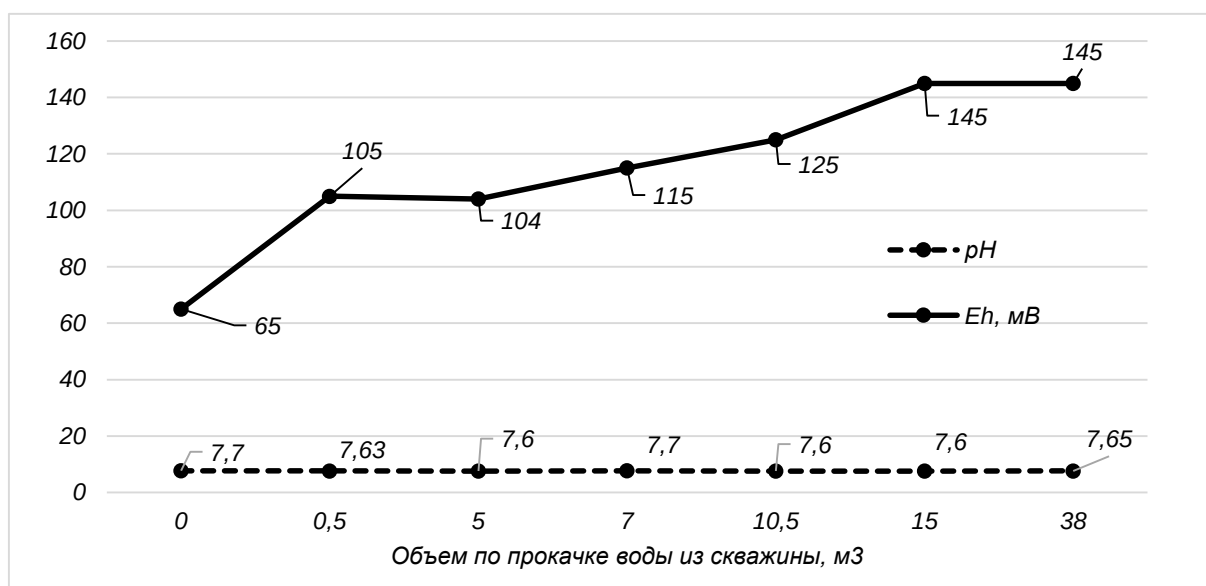


Рисунок 5. – Зависимость величин Eh и pH от объема прокачки воды скважины № 2 на выброс после ее закачки в пласт

Закключение. Итак, проведение стадии закачки воды в пласт из пылевидного и средне-мелкозернистого песка позволило установить следующее.

Основным водоносным слоем в данном случае следует считать средне-мелкозернистые пески. Этот слой имеет большую площадь межпорового пространства, поэтому можно предположить, что на его зернах будет закрепляться более высокая концентрация кислорода, чем в других породах. В пылевидный плотный слой и ввиду его верхнего расположения, скорее всего, будет поступать только незначительная часть кислорода от закаченной воды в пласт.

Первоначальную закачку воды в пласт и подготовку скважины к откачке необходимо проводить под постоянным контролем, желательно все операции выполнять в ручном режиме, особенно уделив внимание росту величины давления на оголовке скважины. При этой величине свыше 0,4 МПа дальнейшую закачку воды в водоносный пласт производить не следует ввиду возможного нарушения стыков колонн скважины и повреждения ее фильтра.

Для более полного проникновения в стадии закачки кислорода в подземный пласт можно периодически предусматривать дополнительные мероприятия, которые используются при проведении восстановительных ремонтных работ скважин.

Установление в воде после закачки величины Eh более 100 мВ свидетельствует об окислении двухвалентного железа в трехвалентную форму и его задержании в подземном пласте.

Следует отметить, что величина pH в процессе закачки воды в скважину и дальнейшей ее прокачки практически не изменяется и составляет 7,6–7,7. Также не происходит изменение концентрации аммонийных соединений – 0,2–0,3 мг/дм³.

После окончания прокачки воды из скважины № 2 была отобрана проба в специализированную лабораторию на органолептические показатели (≤ 2 баллов), железо (0,3 мг/дм³), окисляемость (1,8 мгО₂/дм³) и параметры бактериального анализа, которые показали их соответствие СанПиН 10.124-99 РБ. Скважину можно переключать на водопроводную сеть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Всеволожский, В.А. Основы гидрогеологии / В.А. Всеволожский. – М. : МГУ, 2007. – 448 с.
2. Гледко, Ю.А. Гидрогеология / Ю.А. Гледко. – Минск : Выш. шк., 2012. – 446 с.
3. Гуринович, А.Д. Возможности удаления из воды железа в водоносном пласте на примере существующих водозаборных скважин / А.Д. Гуринович, П. Ваврженюк, И. Ельский // Вода и экология: проблемы и решения. – 2013. – Т. 2, № 54. – С. 12–20.
4. Кудельский, А.В. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод Беларуси / А.В. Кудельский, В.И. Пашкевич. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 261 с.
5. Ленченко, Н.Н. Динамика подземных вод (теоретический курс) / Н.Н. Ленченко. – М. : МГУ, 2004. – 209 с.
6. Плотников, Н.А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод / Н.А. Плотников, В.С. Алексеев. – М. : Стройиздат, 1990. – 256 с.
7. Rott, U. 25 Jahre unterirdische Wasseraufbereitung in Deutschland / U. Rott, M. Friedle // Wasser, Abwasser. – 2000. – Bd. 141, № 13. – S. 99–107.

REFERENCES

1. Vsevolozhskii, V.A. (2007). *Osnovy gidrogeologii*. Moscow: MGU. (In Russ.).
2. Gledko, Y.A. (2012). *Gidrogeologiya*. Minsk: Vysheishaya shkola. (In Russ.).
3. Gurinovich, A.D., Vavrzenyuk, P. & El'skii, I. (2013). Vozmozhnosti udaleniya iz vody zheleza v vodonosnom plaste na primere sushchestvuyushchikh vodozabornykh skvazhin [Possibilities of removing iron from water in an aquifer 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.).
4. Kudel'skii, A.V. & Pashkevich, V.I. (2014). *Regional'naya gidrogeologiya i geokhimiya podzemnykh vod Belarusi*. Minsk: Belarus. navuka. (In Russ.).
5. Lenchenko, N.N. (2004). *Dinamika podzemnykh vod (teoreticheskii kurs)*. Moscow: MGGU. (In Russ.).
6. Plotnikov, N.A. & Alekseev, V.S. (1990). *Proektirovanie i ekspluatatsiya vodozaborov podzemnykh vod*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
7. Rott, U. & Friedle, M. (2000). 25 Jahre unterirdische Wasseraufbereitung in Deutschland. *Wasser, Abwasser*, 141 (13), 99–107. (In German).

Поступила 22.08.2022

WATER INJECTION INTO THE UNDERGROUND AQUIFER OF THE WELL FROM PULVERIZED AND MEDIUM-FINE-GRAINED SAND AT LOW WATER CONSUMPTION

H. RASHKEVICH

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

V. YUSCHENKO

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article describes the main operations for water injecting into the underground aquifer of the well. The authors assessed and evaluated the process of water injection into the aquifer from pulverized and fine-grained sand with low water consumption of the settlement in the Vitebsk region.

Keywords: characteristics of the well and the aquifer, water quality, features of water injection into the underground formation.

УДК 621.644.07

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-71-77

**ОЦЕНКА ОБЩЕГО УРОВНЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ
СТАЛЬНЫХ ПОДЗЕМНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

д-р техн. наук, проф. В.Н. РОМАНИЮК
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
Н.В. СТРУЦКИЙ
(ГПО «Белтопгаз», Минск)

В статье представлены результаты анализа многолетней динамики повреждений защитных покрытий распределительных газопроводов, выявляемых в процессе эксплуатации. Освещена применяемая методика комплексного приборного обследования и диагностирования изоляции. Проведена оценка общего уровня повреждаемости защитных покрытий на основе величины удельной плотности дефектов. Полученные результаты свидетельствуют о незначительной степени износа и отсутствии признаков приближения к предельному состоянию изоляционных покрытий газопроводов, в том числе находящихся в эксплуатации больше 40 лет. Это является дополнительным аргументом в пользу пересмотра нормативного срока службы стальных распределительных газопроводов в сторону увеличения.

Ключевые слова: газораспределительные сети, изоляционное покрытие газопроводов, повреждаемость, дефектность, удельная плотность дефектов, надежность, срок эксплуатации.

Введение. Газоснабжение – одна из форм энергоснабжения, представляющая собой деятельность по обеспечению потребителей газом¹. В масштабах республики потребители – это 3,7 млн. газифицированных квартир, более 9 тыс. коммунально-бытовых организаций непроизводственного характера, более 4 тыс. промышленных предприятий с общим потреблением природного газа до 20 млрд м³ в год. Даже с учетом ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС, природный газ надолго сохранит свою важную роль в производстве тепловой и электрической энергии, создании комфортных условий для населения.

Концепцией Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 года стратегической задачей в газовой сфере определено поддержание производственных фондов на безопасном уровне².

Государственным производственным объединением по топливу и газификации «Белтопгаз» уделяется особое внимание вопросам обеспечения безопасной и безаварийной эксплуатации газораспределительной системы республики и, в первую очередь, ее структурообразующей составляющей – сети наружных распределительных газопроводов.

Весомую и наиболее ответственную часть газовой сети составляют стальные газопроводы. Это связано как со значительно более поздним внедрением труб из полиэтилена в широкую практику строительства (для Беларуси – это начало 2000-х годов), так и долгое время существовавшими ограничениями для полиэтиленовых газопроводов по давлению газа (не более 0,6 МПа, а на территории населенных пунктов – не более 0,3 МПа)³.

Важным элементом стального подземного газопровода, имеющим прямое влияние на его надежность и безопасность, является защитное покрытие. При этом, непосредственно контактируя с эксплуатационной средой, изоляция в наибольшей степени подвергается воздействию ее негативных факторов. В этой связи, вопросы контроля, оценки и прогнозирования технического состояния изоляционных покрытий стальных подземных газопроводов заслуживают отдельного внимания и требуют своего решения на современном научно-техническом уровне.

Следует отметить еще один немаловажный аспект: значительная часть стальных подземных газопроводов превысила нормативный 40-летний срок службы. Данный срок закреплён в Правилах обеспечения промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь⁴, однако установлен еще в советский период, исходя из актуальных тому времени экономических показателей.

Сейчас установленный когда-то временной рубеж давно пройден, максимальный возраст распределительных газопроводов в Беларуси достиг 64-х лет. При этом до настоящего времени не был зафиксирован ни один случай отказа стальных газопроводов из-за возрастной деградации физико-механических свойств металла.

Таким образом, приобретает большую актуальность проблема несоответствия морально устаревшего нормативного срока службы стальных распределительных газопроводов заложенному в них ресурсу эксплуатации, требующая своего решения во избежание затрат на проведение избыточных, преждевременных диагностических работ (например, путем перехода на диагностирование по техническому состоянию).

В контексте данной проблемы ясное понимание степени и динамики общего износа защитных покрытий стальных подземных газопроводов тем более необходимо. Чтобы получить объективную картину в масштабах республики, обобщим и проанализируем результаты многолетней эксплуатационной практики газоснабжающих организаций ГПО «Белтопгаз».

¹ Закон Республики Беларусь о газоснабжении. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=h10300176>.

² Концепция Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 года. – Минск : М-во экон. Респ. Беларусь, 2018. – 82 с. URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/Kontseptsija-na-sajt.pdf>.

³ Газоснабжение : СНиП 2.04.08.87. – Введ. 01.01.88. – М. : Госстрой СССР, 1988. – 64 с.

⁴ Правила обеспечения промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь. – Минск, 2017. – 218 с.

Краткая характеристика газораспределительной сети. Газораспределительная система – производственный комплекс, входящий в систему газоснабжения и состоящий из организационно и экономически взаимосвязанных объектов, предназначенных для организации снабжения газом непосредственно потребителей газа⁵.

Основу, пространственный каркас газораспределительной системы составляют около 65,0 тыс. км наружных распределительных газопроводов, 29,8 тыс. км (зачастую это газопроводы высокого давления и больших диаметров, обладающие высокой пропускной способностью и несущие основную нагрузку по расходам газа) являются стальными, из них 28,0 тыс. км проложено в подземном исполнении. Доля выработавших нормативных срок стальных подземных газопроводов составляет 18,64% при протяженности 5220,2 км (данные по состоянию на 01.08.2022).

К техническому состоянию стальных подземных газопроводов предъявляются повышенные требования, в том числе в части обеспечения защиты от коррозии. Коррозия представляет опасность снижения уровня надежности и безопасности газопроводов вследствие их повреждения и разгерметизации. Используется пассивная и активная (электрохимическая) защита от коррозии.

Защитные покрытия физически отделяют стальные подземные газопроводы от агрессивной среды (грунта). Все без исключения стальные подземные распределительные газопроводы на всем протяжении обеспечены защитными покрытиями «усиленного типа»⁶ («весьма усиленного типа» по ранее принятой терминологии⁷), битумно-мастичными или более современными полимерными.

С 2003 года в системе объединения при строительстве стальных подземных газопроводов применяются наилучшие по своим характеристикам покрытия на основе экструдированного полиэтилена и термоусаживающихся лент. Вместе с тем, учитывая, что к тому моменту пик строительства стальных газопроводов уже прошел, доля таких покрытий не превышает 10%.

Под электрохимической защитой (ЭХЗ) находятся более 26,0 тыс. км стальных подземных распределительных газопроводов. Для этого используется метод катодной поляризации, заключающийся в придании газопроводу отрицательного электрического потенциала относительно окружающей среды, что обеспечивает эффективное противодействие протекающим в грунте коррозионным процессам.

Методика обследования и диагностирования изоляционных покрытий. Существующий порядок технического обслуживания стальных подземных распределительных газопроводов включает в себя ряд технических мероприятий, основными из которых являются:

- периодическое приборное обследование (комплексное приборное обследование – КПО);
- диагностирование (оценка) технического состояния газопроводов, выработавших нормативный срок службы.

Комплексное приборное обследование включает в себя выявление мест повреждений изоляции и утечек газа бесконтактными методами, без вскрытия трубопровода. Защитные покрытия обследуют такими приборами, как искатель повреждений изоляции трубопроводов ИПИТ различных модификаций, комплекс поисково-диагностический «Прогресс» ФК-01 и др. Их принцип работы, как правило, основан на обнаружении изменения электромагнитного поля, создаваемого вокруг исследуемого металлического трубопровода протекающим по нему током, что позволяет определять такие изменения состояния покрытия, как нарушение целостности, потеря электроизолирующих свойств, резкий переход толщины и т.д.

Таким образом, если контроль металла трубы, по сути, ведется по наличию уже свершившегося факта критического повреждения (а утечка газа однозначно указывает на потерю целостности трубопровода), то в части изоляции чувствительность контроля находится уже на уровне незначительных дефектов, либо даже изменений состояния, еще не вышедших за допустимые пределы.

Все выявленные дефекты изоляции подлежат обязательному устранению:

- в течение 1 месяца после обнаружения в застроенной части и зонах опасного влияния блуждающих токов;
- не позднее 3 месяцев в остальных случаях⁸.

Таким образом, целостность и защитные свойства защитного покрытия по результатам КПО полностью восстанавливаются.

Следует отметить, что на территории нашей страны подобный жесткий режим поддержания технического состояния изоляционного покрытия соблюдался всегда и в полном объеме – с момента сдачи в эксплуатацию первого стального подземного газопровода. Это оказало безусловное положительное влияние на общую надежность газораспределительной системы.

Другой взаимосвязанный аспект – в каждом вскрытом для ремонта шурфе осуществляется непосредственное наблюдение и изучение состояния изоляции и трубы, учет и типизация дефектов. По опыту, к основным эксплуатационным дефектам изоляции относятся продавливание твердыми включениями грунта, повреждения корнями растений, микротрещины, отслоение (рисунок 1).

⁵ См. сноску 1.

⁶ Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии : ГОСТ 9.602-2016. – Введ. 01.06.17. – М. : Стандартинформ, 2016. – 87 с.

⁷ Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии : ГОСТ 9.602-1989. – Введ. 01.01.91. – М. : Госстандарт СССР, 1989. – 59 с.

⁸ См. сноску 4.



Рисунок 1. – Типичные повреждения изоляционного покрытия газопроводов

Комплексное приборное обследование, как правило, проводится каждые 5 лет, отдельные характерные участки (например, переходы через естественные и искусственные преграды) обследуются чаще. Также КПО входит в состав работ, выполняемых при диагностировании (оценке) технического состояния стальных подземных газопроводов, выработавших нормативный срок службы. Методика и порядок проведения диагностических работ установлены отраслевой Инструкцией по оценке технического состояния подземных газопроводов, выработавших нормативный срок службы (11-95.25)⁹.

Данная инструкция отражает подходы к техническому диагностированию распределительных газопроводов, сложившиеся в контексте общесоюзной практики (РД 204 РСФСР 3.3-87, затем РД 243 РФ 3.11-1999), а также собственные, отечественные наработки. Документ согласован с надзорным органом в области промышленной безопасности – Госпромнадзором.

Кроме приборного обследования методика предполагает шурфовое обследование (при котором производится измерение толщины, переходного электрического сопротивления, сплошности и адгезии изоляции), анализ технической документации на объект за весь период эксплуатации и, наконец, выставление итоговой оценки.

Ключевым параметром, по которому производится оценивание состояния изоляционного покрытия, является количество дефектов. Принятая градация предусматривает оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно».

Таким образом, благодаря непрерывному циклу обследований и диагностических работ накапливается массив данных по всем эксплуатируемым объектам, в том числе на протяжении ряда последних лет, – с использованием возможностей специализированных программных комплексов [1].

Оценка общего состояния изоляционных покрытий. Сделаем небольшое отступление и уточним место изоляционного покрытия в схеме обеспечения надежности стального подземного газопровода.

С точки зрения надежности, стальной подземный газопровод можно представить как систему, состоящую из трех элементов с последовательным и параллельным соединением (рисунок 2). По сути, это будет упрощенный вариант классической схемы надежности трубопровода, предложенной А.М. Зиневичем в работе [2], с небольшим уточнением в части вспомогательной роли защитных элементов.



Рисунок 2. – Модель-схема надежности стального подземного газопровода

Данная модель дает необходимый уровень приближения, чтобы проиллюстрировать два основных момента. Во-первых, несмотря на физическое соединение, сцепление с поверхностью стального трубопровода, изоляционное покрытие является отдельным элементом системы, так как выполняет самостоятельную функцию, и имеет свои, специфические физические свойства и конструкцию.

⁹ Инструкция по оценке технического состояния подземных газопроводов, выработавших нормативный срок службы : 11-95.25 // Защита и оценка технического состояния систем газоснабжения. – Минск, 2006. – С. 162–190.

Во-вторых, изоляция является защитным, вспомогательным элементом, при этом, как правило, действующим в паре с другим защитным элементом – электрохимической защитой. При снижении защитных свойств изоляционного покрытия катодный потенциал успешно препятствует растворению металла в грунте (естественно, расход защитного тока при этом увеличивается).

Отсюда вытекают два следствия. Первое, определение и построение базовых зависимостей для оценки и прогнозирования технического состояния защитного покрытия должно производиться на основании данных, непосредственно относящихся к защитному покрытию. Второе, повреждение защитного покрытия, пока под ним нет коррозии трубы, нельзя ранжировать как повреждение (тем более, как отказ) газопровода.

Под термином «повреждение» в настоящей статье будем понимать (в соответствии с определением, данным в СН 1.04.01-2020) дефект, образующийся в результате природно-климатических, механических, химических или других воздействий¹⁰.

Наиболее полно принципы определения надежности для трубопроводных систем представлены А.А. Иониным в работе «Надежность систем тепловых сетей» [3]. Надежность трубопроводной системы определяется как совокупность надежностей ее элементов. Количественная оценка надежности базируется на обработке статистики отказов, для расчетов используются ключевые параметры потока отказов ω и средней интенсивности отказов λ .

Вместе с тем, как уже отмечалось выше, в случаях дефектов изоляции не идет речь о потере работоспособности (отказах) газопровода. Имеет место локальная потеря исправности вспомогательного элемента, в определенной мере снижающая эксплуатационно-технические характеристики газопровода.

В силу этого, использование общепринятых в теории надежности параметров ω и λ в данном случае искусственно занижает общие показатели надежности. Для возможности корректного оценивания состояния изоляционного покрытия в процессе эксплуатации целесообразно исходить из степени его повреждаемости (дефектности).

Определим удельную повреждаемость как среднее число повреждений элемента в год. Она будет равна величине, обратной среднему промежутку времени между повреждениями одного элемента¹¹. Характеризовать повреждаемость будем через относительное распределение выявляемых дефектов изоляции по длине трубопровода, то есть удельную плотность дефектов на единицу длины контролируемого участка, $D_{\text{деф}}$. Данный показатель напрямую отражает текущее техническое состояние защитных покрытий, позволяя провести на основании динамики его изменения дальнейший продуктивный анализ.

Итак, рассмотрим газораспределительную сеть республики как совокупность типовых объектов – газопроводов (это так и есть), а всю совокупность изоляционных покрытий газопроводов – как отдельный большой элемент газораспределительной сети.

Для оценки этого элемента используем массив статистических данных, обобщающих результаты комплексного приборного обследования газопроводов (в том числе, проведенного в рамках технического диагностирования газопроводов со сроком службы 40 лет и более) с 2010 по 2021 год. Это достаточно длительный период, в течение которого все стальные подземные газопроводы прошли не менее двух комплексных приборных обследований. При годовых объемах КПО в районе 6,5 тыс. км, общая протяженность обследованных приборным способом газопроводов составила 78494,0 км (рисунок 3).

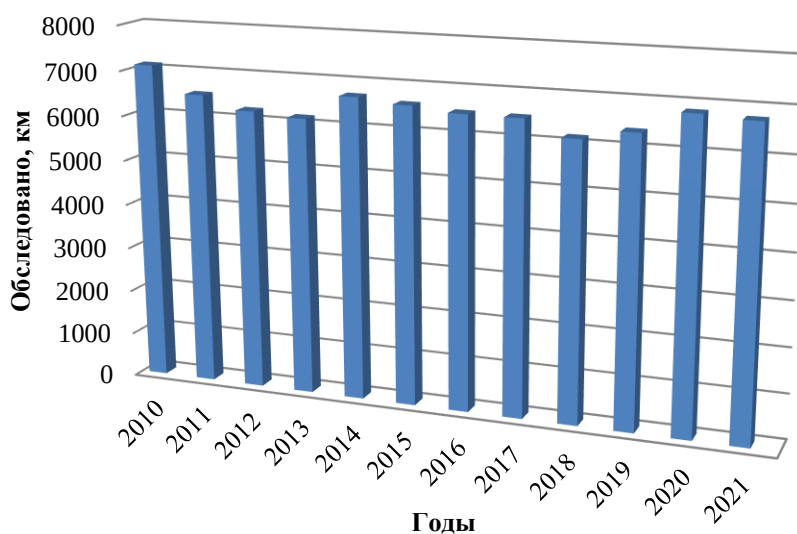


Рисунок 3. – Объемы работ по КПО газопроводов

¹⁰ Техническое состояние зданий и сооружений : СН 1.04.01-2020. – Введ. 27.10.20. – Минск : Стройтехнорм, 2021. – 68 с.

¹¹ Экономика надежности электроснабжения : пер. докл. на конф. Англ. ин-та инженеров-электриков (окт. 1967 г.) / под ред. Ю.А. Якуба. – М. : Энергия, 1969. – 208 с.

Для удобства работы на реальных объектах, обычно имеющих протяженность от нескольких сотен метров до нескольких километров, газопровод, согласно действующей методике диагностирования, при обследовании и дальнейшем оценивании изоляции условно делится на стометровые участки¹².

Таблица 1. – Оценка состояния изоляционного покрытия в зависимости от количества повреждений

Количество мест повреждения изоляции, обнаруженных приборами при проверке газопровода без вскрытия грунта на каждом стометровом участке	Локальная оценка по каждому стометровому участку
0–1	«отлично»
2–3	«хорошо»
4–8	«удовлетворительно»
Свыше 8	«неудовлетворительно»

Для характеристики изоляционных покрытий на уровне целой газораспределительной системы удобнее оперировать величинами с размерностью дефект на километр.

Таким образом, отличная оценка изоляции будет предполагать значение плотности дефектов не более 10 деф./км, хорошая – 30 деф./км, удовлетворительная – 80 деф./км, при превышающем данный предел значении покрытие будет признано негодным.

Для общей характеристики технического состояния защитного покрытия стальных подземных газопроводов как одного большого элемента газораспределительной сети целесообразно применить данную градацию к укрупненным в масштабах республики показателям, принятым как отношение суммарного числа выявленных в течение календарного года дефектов к суммарной протяженности обследованных за год газопроводов.

На рисунке 4 представлены результаты приборного обследования изоляции газопроводов (с учетом объемов работ, выполняемых при диагностировании) за рассматриваемый период. Отдельно показаны плотности дефектов изоляции для газопроводов, выработавших нормативный срок службы.

Как видно из рисунка 4, значения плотности дефектов защитных покрытий стальных распределительных газопроводов, взятых по всей протяженности, находятся в диапазоне от 0,45 до 0,66 деф./км, среднее значение плотности дефектов (штриховая линия) составляет 0,56 деф./км. Значения плотности изоляции на газопроводах со сроком службы 40 лет и более находятся в диапазоне от 0,42 до 0,98 деф./км, среднее значение плотности дефектов составляет 0,74 деф./км. Максимальное превышение плотности дефектов покрытия для газопроводов, выработавших нормативный срок службы, над общим уровнем зафиксировано в 2012 году и составило 0,35 деф./км. Разница между средними значениями плотности дефектов защитных покрытий для всей протяженности стальных распределительных газопроводов и для газопроводов, выработавших нормативный срок службы, составляет 0,18 деф./км.

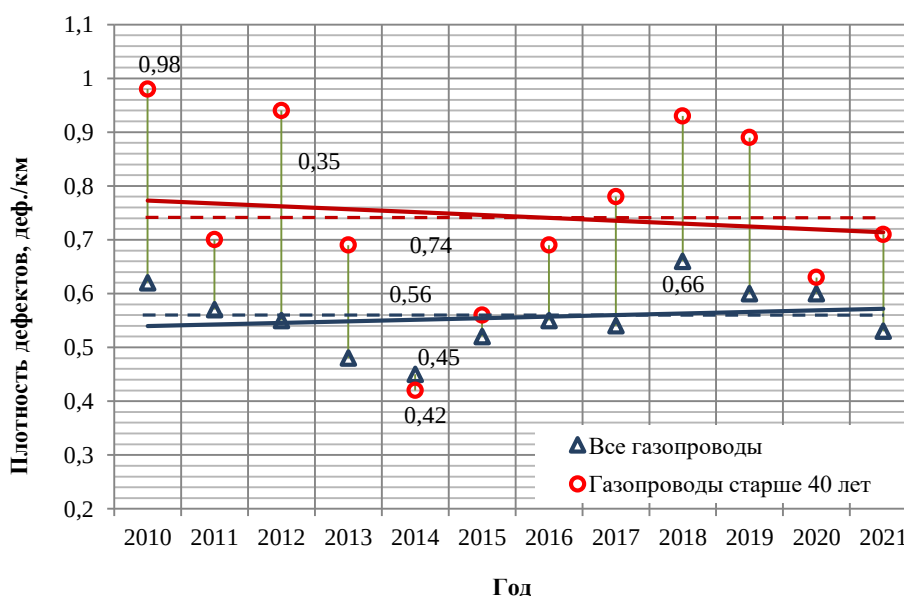


Рисунок 4. – Анализ годовых плотностей дефектов изоляционного покрытия за период с 2010 по 2021 год

Итак, вся полоса значений плотности дефектов защитного покрытия полностью укладывается в диапазон от 0,4 до 1,0 деф./км.

Разброс данных в десятые доли деф./км можно оценить как практически ничтожный, учитывая, что состав попадающих под обследование объектов ежегодно полностью меняется, а статистическая база составляет примерно 6,5 тыс. км газопроводов в год. Несколько больший разброс данных для газопроводов со сроком службы 40 лет и более объясняется их меньшей протяженностью, и, соответственно, более узкой статистической базой.

¹² См. сноску 9.

В соответствии с принятой градацией оценивания¹³, максимальный достигнутый уровень плотности дефектов в 1,0 дефект./км составляет 10% от предельного значения для оценки «отлично», 3,33% для оценки «хорошо» и всего 1,23% для удовлетворительной оценки. Если бы мы построили графики дефектности изоляции, отложив на оси ординат всю область допустимых значений $D_{\text{деф}} - 80$ дефект./км, мы бы получили практически совпадающие друг с другом, и осью абсцисс, прямые.

Поскольку образование дефектов изоляционных покрытий газопроводов до настоящего времени представляет собой равномерно развивающийся во времени процесс, для получения математической модели, выражающей общую тенденцию (тренд) изменения уровня временного ряда плотности дефектов изоляции, его аналитическое выравнивание проведено по линейной функции. Для расчета аппроксимации использован табличный процессор Excel.

Как видно, оба тренда (сплошные линии на рисунке 4), как для защитных покрытий в целом, так и для изоляции газопроводов старше 40 лет, имеют очень малые коэффициенты регрессии, демонстрируя устойчивость уровня технического состояния во времени.

Итак, по результатам проведенного анализа, удельная повреждаемость изоляционных покрытий стальных подземных газопроводов составляет 0,56 дефект./км·год, временной интервал между повреждениями изоляции на 1 км газопровода – 1,79 года, оценка технического состояния – «отлично», прогноз изменения технического состояния – положительный.

Для газопроводов старше 40 лет удельная повреждаемость изоляционных покрытий стальных подземных газопроводов составляет 0,74 дефект./км·год, временной интервал между повреждениями изоляции на 1 км газопровода – 1,35 года, оценка технического состояния – «отлично», прогноз изменения технического состояния – положительный.

Для проверки и подтверждения полученных результатов воспользуемся методикой определения оценки технического состояния зданий и сооружений, строительных конструкций и инженерных систем согласно СН 1.04.01-2020. По данной методике техническое состояние оцениваемого объекта (элемента) характеризуется пятью категориями технического состояния (КТС) – от I до V, в порядке увеличения степени износа и снижения работоспособности. В свою очередь, КТС назначается в соответствии со степенью распространения дефектов, их классом и степенью ответственности элемента¹⁴.

Определим степень распространения дефектов. Данный показатель имеет следующую градацию:

- единичные дефекты – занимающие 10% и менее площади, линейного размера или количества;
- многочисленные дефекты – занимающие от 10% до 40% площади, линейного размера или количества;
- массовые дефекты – занимающие более 40% площади, линейного размера или количества.

Приняв из практики (с запасом) эквивалентную длину участка повреждения защитного покрытия $l_{\text{экв}}=2,0$ м (стандартная длина шурфа), при максимальной достигнутой плотности дефектов в 0,98 дефект./км получаем 1,96% от принятой линейного размера участка газопровода в 1 км. По степени распространения это единичные дефекты.

Учитывая вспомогательную функцию защитного покрытия, его повреждения необходимо относить к классу малозначительных (при наличии ЭХЗ) либо, в худшем случае (при отсутствии ЭХЗ и влиянии дополнительных негативных факторов), классу значительных дефектов, степень ответственности элемента – 2.

В первом случае защитное покрытие соответствует I, наивысшей, категории КТС. Состояние оценивается как исправное: дефекты устраняются в процессе установленного регламента технического обслуживания. При фактических нагрузках и воздействиях эксплуатация в соответствии с функциональным назначением разрешается без ограничений до очередного обследования.

Во втором случае защитное покрытие соответствует II категории КТС. Состояние оценивается как работоспособное: имеющиеся дефекты не приводят к нарушению работоспособности конструкции в данных конкретных условиях эксплуатации, но в перспективе могут снизить ее долговечность. Дефекты устраняются в процессе технического обслуживания и текущего ремонта. При фактических нагрузках и воздействиях эксплуатация конструкции разрешается без ограничений до очередного обследования.

Таким образом, оценка технического состояния изоляции стальных подземных распределительных газопроводов по степени ее удельной повреждаемости, проведенная по двум методикам, показывает схожие результаты.

В любом случае, вне зависимости от применяемой методики, очевидно, что один дефект защитного покрытия на километр или два газопровода является крайне низким показателем износа. При этом следует еще дополнительно учесть такие моменты, как:

- высокая чувствительность применяемых при обследовании приборов, позволяющая выявлять минимальные дефекты, или даже преддефектные состояния;
- отсутствие немедленного и безусловного последствия повреждения изоляции в виде коррозии трубы;
- обязательное устранение всех дефектов защитного покрытия газопроводов в срок от 1-го до 3-х месяцев.

Безусловно, общие показатели надежности нельзя прямо распространять на конкретные единичные объекты газораспределительной системы, рассматриваемые в отдельности. Их техническое состояние, в силу различных причин, может значительно отличаться от среднего уровня. Вместе с тем, представленные результаты анализа многолетней динамики повреждений однозначно свидетельствуют о том, что защитные покрытия стальных подземных газопроводов в масштабах республики находятся в периоде нормальной эксплуатации, и признаков их приближения к предельному состоянию нет.

¹³ См. сноску 9.

¹⁴ См. сноску 10, таблица 12.3.

Закключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Впервые выполнен анализ многолетних данных о повреждениях изоляционных покрытий, выявляемых в ходе приборного обследования и диагностирования стальных подземных распределительных газопроводов.
2. Через показатель плотности дефектов определена степень повреждаемости (дефектности) защитных покрытий. Вся полоса значений плотности дефектов полностью укладывается в диапазон от 0,4 до 1,0 дефект./км. Удельная повреждаемость изоляции стальных подземных газопроводов составляет 0,56 дефект./км-год, временной интервал между повреждениями изоляции на 1 км газопровода – 1,79 года. Для газопроводов старше 40 лет удельная повреждаемость изоляции составляет 0,74 дефект./км-год, временной интервал между повреждениями изоляции на 1 км газопровода – 1,35 года.
3. Произведена аппроксимация общей тенденции изменения плотности дефектов изоляции, процесс изменения уровня данного показателя имеет спокойный, равномерный характер.
4. Проведена оценка технического состояния защитного покрытия стальных подземных распределительных газопроводов по степени ее удельной повреждаемости по двум методикам. Согласно методике, изложенной в Инструкции И 1-95.25, общее состояние покрытий должно быть оценено как отличное. Согласно методике, изложенной СН 1.04.01-2020, общее состояние покрытий необходимо отнести к I категории КТС (исправное состояние), либо (при отсутствии ЭХЗ и влиянии дополнительных негативных факторов) ко II категории КТС (работоспособное состояние).
5. Предыдущий вывод верен также для покрытий, находящихся в эксплуатации больше 40 лет, что, наряду с отсутствием случаев отказа металла труб из-за возрастной деградации физико-механических свойств, является дополнительным доводом в пользу отмены установленного нормативного срока службы стальных распределительных газопроводов и перехода на их диагностирование по техническому состоянию. Данная мера позволит сэкономить значительные государственные средства.
6. В целом, использование массива накопленных в процессе эксплуатации данных о повреждениях объектов и элементов газораспределительной системы является одним из приоритетных направлений для повышения точности оценки и прогнозирования их технического состояния и требует дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Струцкий, Н.В. Единая автоматизированная система ГПО «Белтопгаз». От идеи к результату / Н.В. Струцкий, В.Ю. Васильев // Энергетическая стратегия. – 2017. – Т. 3, № 57. – С. 52–55.
2. Зиневич, А.М. Научно-техническое обеспечение надежности сооружения линейной части магистральных трубопроводов / А.М. Зиневич. – М. : Информнефтегазстрой, 1984. – 132 с.
3. Ионин, А.А. Надежность систем тепловых сетей / А.А. Ионин. – М. : Стройиздат, 1989. – 265 с.

REFERENCES

1. Strutskiy, N.V. & Vasil'ev, V.Y. (2017). Edinaya avtomatizirovannaya sistema GPO «Beltopgaz». Ot idei k rezul'tatu. *Energeticheskaya strategiya*, 3 (57), 52–55. (In Russ.).
2. Zinevich, A.M. (1984). *Nauchno-tekhnicheskoe obespechenie nadezhnosti sooruzheniya lineinoi chasti magistral'nykh truboprovodov*. Moscow: Informneftegazstroj. (In Russ.).
3. Ionin, A.A. (1989). *Nadezhnost' sistem teplovykh setei*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).

Поступила 14.10.2022

ASSESSMENT OF THE GENERAL LEVEL OF DAMAGEABILITY TO INSULATION COATINGS OF STEEL UNDERGROUND GAS DISTRIBUTION PIPELINES

V. ROMANIUK

(Belarusian National Technical University, Minsk)

N. STRUTSKY

(Beltopgaz SPA, Minsk)

The article presents the results of analysis of long-term dynamics of damage of protective coatings of distribution gas pipelines revealed in the process of operation. The applied methodology of complex instrumental inspection and diagnostics of insulation is highlighted. The estimation of the general level of damageability of protective coverings on the basis of the value of specific density of defects was carried out. The received results testify to an insignificant degree of wear and absence of signs of approaching the limit state of gas pipelines' insulating coatings, including those being in operation for more than 40 years. This is an additional argument in favor of revising the normative service life of steel distribution gas pipelines towards increase.

Keywords: gas distribution networks, insulating coating of gas pipelines, damageability, defectability, specific defect density, reliability, service life.

UDC 666.973.2:666.97.031

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-78-81

METHODS FOR REMOTE QUALITY CONTROL OF COMPOSITES WITH ORGANIC AGGREGATES

A. YAGUBKIN¹, Z. ZHIXU²

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4124-3634>¹ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6909-4832>²

The Chinese construction industry has been using the Internet of Things (IoT) to monitor building materials and structures for many years. The achievements of the Chinese construction industry in IoT applications can be used to study and monitor the performance of building materials, including green buildings (energy-efficient building materials).

The aim of research: study and optimization methods for remote quality control of composites with organic aggregates.

With the help of the developed methods, the following dependencies were obtained: dependences of stresses inside composites with organic aggregates on external influences obtained using a sensor Keyes brick thin film pressure sensor, dependences of deformations inside composites with organic aggregates on external influences obtained using a sensor ultrasonic ranging sensor, dependences of humidity inside composites with organic aggregates on external influences obtained using a sensor Soil moisture sensor, dependences of rheology (cement paste setting time) obtained using a sensor Ph-sensor module.

Keywords: *internet of things, methods for remote quality control, composites with organic aggregates.*

Introduction. In order to ensure the safety of the building, it is necessary to monitor the health of the key parts of the building in real time and forecast the safety situation, so as to find the location of the problems inside the building structure and the severity of the related problems as soon as possible, and then accurately predict the performance of the building structure and predict the situation [1]. Estimate the remaining life of the building and make corresponding maintenance decisions according to the specific situation of building safety, so as to effectively solve the problem of building safety prevention and health monitoring, prevent the occurrence of building-related accidents and disasters, and ensure the safety of users' lives and property [2]. In normal production and life, building safety monitoring has received more and more attention from people.

The Chinese construction industry has been using the Internet of Things (IoT) to monitor building materials and structures for many years [3–8]. The achievements of the Chinese construction industry in IoT applications can be used to study and monitor the performance of building materials, including green buildings (energy-efficient building materials [9–26]).

The aim of research: Study and optimization methods for remote quality control of composites with organic aggregates. To achieve the aim, the following objectives were solved: make an overview of the experience of the Chinese construction industry in implementing methods internet of things for remote quality control of building materials and structures; compare the quality characteristics of composites with organic aggregates tested in the laboratory and using special sensors: compressive strength, deformation, humidity, cement paste setting time; give recommendations on optimizing the accuracy of the sensors for remote quality control of composites with organic aggregates.

Main part. Methods for monitoring various indicators in building materials and structures will be presented below.

Method for remote quality control of the stress-strain state of composites with organic aggregates using ultrasonic ranging sensor and Keyes brick thin film pressure sensor: Ultrasonic ranging sensor and Keyes brick thin film pressure sensor are placed on the outer surfaces and inside the material (figure 1, a). Sensors collect information about the material. The example is placed in the PM-2MG4 press and the test begins. The press shows the load and strain values. Sensors show similar values. As can be seen from table 1, these values correlate well with each other.

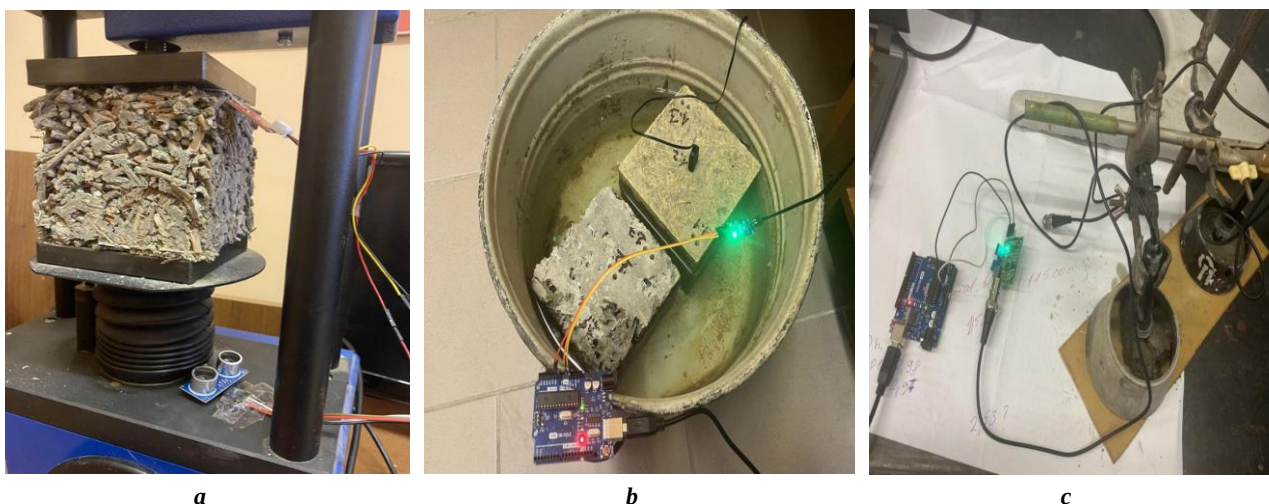
The following samples were used: straw-cement sand block with a density of 1350 kg/m³ (example 1) and wood concrete with a density of 550 kg/m³ (example 2).

Method for remote quality control of the humidity state of composites with organic aggregates using humidity sensor: Humidity sensor are placed on the inside the material (figure 1, b). Sensor collect information about the material. For moisture monitoring, samples are first dried to constant weight and then placed in a container of water. At certain intervals, they are removed from the water and weighed (their moisture content is determined). Humidity sensors show their values in parallel. The results of moisture determination at different points of the material, as well as their correlation, are shown in table 2. The results showed a high correlation with the standard method.

The following samples were used: straw-cement sand block with a density of 1350 kg/m³ (example 1) and wood concrete with a density of 550 kg/m³ (example 2).

Method for remote quality control of the rheology (cement paste setting time) using Ph-sensor module: Ph-sensor are placed on the inside the control liquid for calibration. After Ph-sensor are placed on the inside the cement paste (figure 1, c). For tests, a cement paste of normal density (example 1) and a cement paste of normal density with the addition

of a giperplasticizer (example 2) were selected with a reduction in water consumption by 30%. In parallel with the work of the sensors, the setting time was determined on the Vicat device. Sensors collect information about the material. The results obtained by the sensors generally coincide with the tests on the Vicat device (figure 2).



a – of the stress and strain; **b** – of the humidity; **c** – of the setting time of the cement paste
Figure 1. – Location of sensors in the material to obtain the values

Table 1. – Changes in pressure and deformation of composite materials tested by sensors and press

Example 1					
Data obtained from the press PM-2MG4:		Data received from sensors:		Statistical indicators	
Compressive strength, kN	Deformations, mm	Pressure sensor	Distance sensor	Correlation compressive strength	Correlation deformations
0,003	0,2	430	6,90	0,93	0,99
0,005	0,3	626	6,92		
0,019	1,5	847	7,50		
0,032	1,7	946	7,60		
Example 2					
Data obtained from the press PM-2MG4:		Data received from sensors:		Statistical indicators	
Compressive strength, kN	Deformations, mm	Pressure sensor	Distance sensor	Correlation compressive strength	Correlation deformations
0,189	0,6	563	7,50	0,83	0,95
0,233	0,8	747	7,60		
0,363	1,0	859	7,60		
0,774	2,1	911	7,69		
0,961	3,8	953	7,79		

Table 2. – Changes in pressure and deformation of composite materials tested by sensors and press

Example 1 (Dry mass = 4,714 kg)								
Time (min)	Humidity Sensor Value in point №:			Mass of moistened per time,kg	Humidity per time, %	Correlation between sensor value and humidity		
	1,1	1,2	1,3			1,1	1,2	1,3
0	1	0	0	4,714	0,00	0,997	0,999	0,993
10	366	426	345	5,374	14,00			
15	391	429	352	5,380	14,13			
20	397	429	381	5,380	14,13			
25	402	429	397	5,380	14,13			
Example 2 (Dry mass = 2,180 kg)								
Time (min)	Humidity Sensor Value in point №:			Mass of moistened per time,kg	Humidity per time, %	Correlation between sensor value and humidity		
	1,1	1,2	1,3			2,1	2,2	2,3
0	0	0	0	2,180	0,00	0,997	0,999	0,994
10	382	395	459	2,772	27,16			
15	449	421	461	2,834	30,00			
20	472	430	461	2,850	30,73			
25	476	430	461	2,850	30,73			

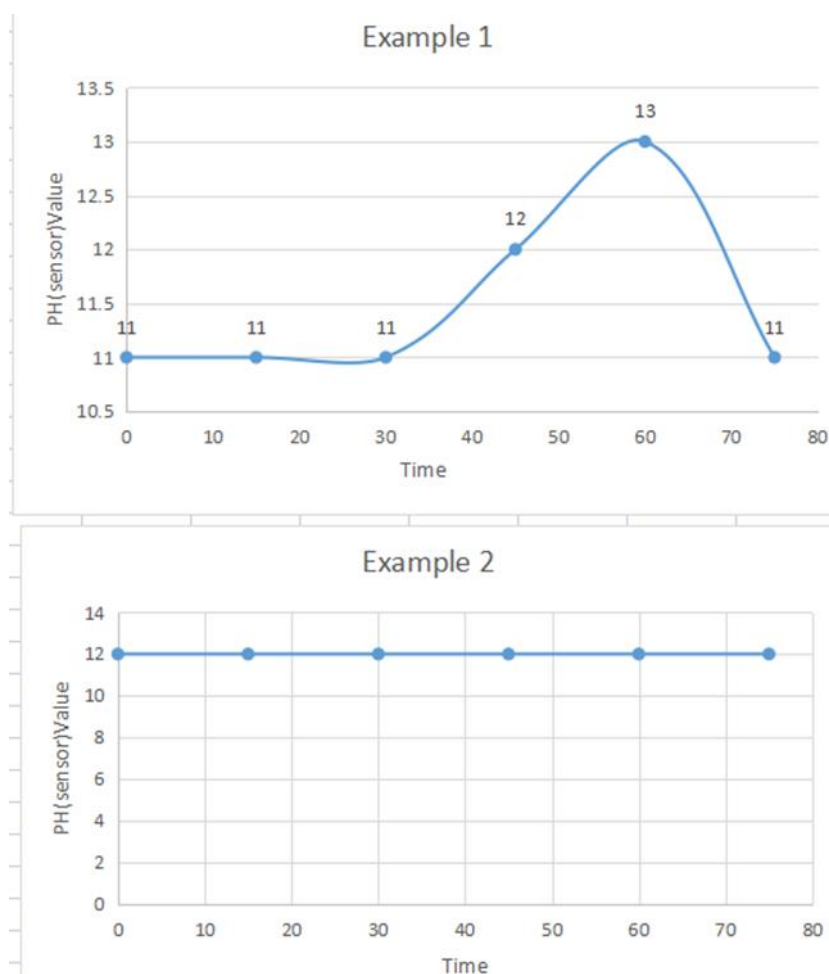


Figure 2. – Rheology (set time of cement paste) linear diagram

Conclusions and recommendations for the further use of sensors for remote monitoring of properties. Method for remote quality control of the stress-strain state of composites with organic aggregates using ultrasonic ranging sensor and Keyes brick thin film pressure sensor, method for remote quality control of the humidity state of composites with organic aggregates using temperature and humidity sensor, method for remote quality control of the rheology (cement paste setting time) using Ph-Sensor Module – work and show good results. With the help of the developed methods, the following dependencies were obtained: dependences of stresses inside composites with organic aggregates on external influences obtained using a sensor Keyes brick thin film pressure sensor, dependences of deformations inside composites with organic aggregates on external influences obtained using a sensor ultrasonic ranging sensor, dependences of humidity inside composites with organic aggregates on external influences obtained using a sensor Soil moisture sensor, dependences of rheology (cement paste setting time) obtained using a sensor Ph-sensor module. The results obtained using the developed methods showed a high degree of correlation with standard tests and can be recommended for determining the properties during the operation of buildings and structures. For a more reliable determination of the strength and deformation characteristics, it is recommended to isolate the sensors from interference. For a more accurate determination of the characteristics of materials and structures, it is recommended to use ADCs of higher accuracy classes. Method for remote quality control of the rheology (cement paste setting time) using Ph-Sensor Module can also be used to control concrete carbonation and durability, but this needs more research.

REFERENCES

1. Xiu, J., Yazhi, J. & Huanchun, Z. (2001). Realization of frequency measurement of vibrating wire sensor by equal-precision frequency measurement method. *Sensor Technology*, 06, 53–55.
2. Dongliang, Z. (2018). Design and implementation of wifi-based IoT intelligent building control system. *Nanjing University of Posts and Telecommunications*, 19, 23–25.
3. Zhijun, G. (2014). Research on building safety monitoring technology based on wireless sensor network. *Dalian University of Technology*, 01, 122–128.
4. Xiaomeng, S., Xin, F. & Jing, Z. (2005). Sensor optimization method based on damage identifiability. *Journal of Dalian University of Technology*, 50 (02), 264–270.
5. Xu, W. (2005). “75·8” event of Shimantan Reservoir. *China Flood Control and Drought Relief*, (03), 27–37.

6. Liangming, M., Weisheng, W. & Shengsan, S. (2002). Application of vibrating wire sensor and automatic network measurement system in bridge safety monitoring system. *Journal of Sensing Technology*, (01), 73–76.
7. Taili, B., Ling, H., Caiyun, H. & Tielu, D. (2017). Multifunctional intelligent detector based on vibrating wire sensor. *Sensor Technology*, (03), 60–62.
8. Jinkai, W. (2007). Research on IoT Node Information Collection and Credibility Measurement Method. *University of Electronic Science and Technology of China*, 08, 47–51.
9. Gutkowski, R., Brown, K., Shigidi, A. & Natterer, J. (2008). Laboratory tests of composite wood-concrete beams. *Construction and Building Materials*, (22), 1059–1066. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.013.
10. LeBorgne, M.R. & Gutkowski, R. (2010). Effects of various admixtures and shear keys in wood-concrete composite beams. *Construction and Building Materials*, (24), 1730–1738. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.016.
11. Kevern, T.T., Biddle, D. & Cao, Q. (2015). Effects of macrosynthetic fibers on pervious concrete properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (9), 06014031-1–06014031-6. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001213.
12. Katkar, P.M., Patil, C.A., Khude, P.A., Jain, A.M. & Chougule, S.S. (2012). Coir-cement composite. *Melliand International*, 18 (2), 132–134. URL: https://www.researchgate.net/publication/287047716_Coir-cement_composite.
13. Kayali, O., Haque, M.N. & Zhu, B. (1999). Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, (29), 1835–1840. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00179-9.
14. Bederina, M., Laidoudi, B., Goullieux, A., Khenfer, M.M., Bali, A. & Quéneudec, M. (2009). Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials*, (23), 1311–1315. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.029.
15. Mungwa, M.S., Jullien, J.-F., Foudjet, A. & Hentges, G. (1999). Experimental study of a composite wood-concrete beam with the INSA-Hilti new flexible shear connector. *Construction and Building Materials*, (13), 371–382. DOI: 10.1016/S0950-0618(99)00034-3.
16. Olorunnisola, A.O. (2009). Effects of husk particle size and calcium chloride on strength and sorption properties of coconut husk-cement composites. *Industrial crops and products*, (29), 495–501. DOI: 10.1016/j.indcrop.2008.09.009.
17. Taoukil, D., El Bouardi, A., Sick, F., Mimet, A., Ezbakhe, H. & Ajzoul, T. (2013). Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite. *Construction and Building Materials*, (48), 104–115. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.067.
18. Fu, Q., Yan, L., Ning, T., Wang, B. & Kasal, B. (2020). Interfacial bond behavior between wood chip concrete and engineered timber glued by various adhesives. *Construction and Building Materials*, (238), 117743. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117743.
19. Khorami, M. & Ganjian, E. (2011). Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus. *Construction and Building Materials*, (25), 3661–3667. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.052.
20. Salem, T., Foiss, M., Omikrine-Metalssi, O., Manuel, R. & Fen-Chong, T. (2020). Thermal and mechanical performances of cement-based mortars reinforced with vegetable synthetic sponge wastes and silica fume. *Construction and Building Materials*, (264), 120213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120213.
21. Lacoste, C., Bergeret, A., Corn, S. & Lacroix, P. (2018). Sodium alginate adhesives as binders in wood fibers/textile waste fibers biocomposites for building insulation. *Carbohydrate Polymers*, (184), 1–8. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.12.019.
22. Subbotina, N., Gorlenko, N., Sarkisov, Y., Naumova, L. & Minakova, T. (2016). Control of Structurization Processes in Wood-Cement Systems at Fixed pH. *AIP Conference Proceedings*, (1698), 060003-1–060003-6. DOI: 10.1063/1.4937858.
23. Yagubkin, A.N. (2017). Innovatsionnyi konstruksionno-teploizolyatsionnyi arbolit s zadannymi svoistvami. *BST: byulleten' stroitel'noi tekhniki*, 10 (998), 42–43. URL: <http://bstmag.ru/article?id=1506>.
24. Bozylev, V.V. & Yagubkin, A.N. (2017). Innovatsionnyi arbolit s zadannymi svoistvami. *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: sb. nauch. tr.*, (9), 96–112. DOI: 10.23746/2017-9-7.
25. Bozylev, V.V. & Yagubkin, A.N. (2011). Izuchenie mekhanizma deistviya dobavki Arbel na protsessy nabora prochnosti tsementnoi sostavlyayushchei arbolita. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, (16), 89–96. URL: http://elb.psu.by:8080/bitstream/123456789/711/1/Bozylev_2011-16-p89.pdf.
26. Bozylev, V.V. & Yagubkin, A.N. (2009). K voprosu razrabotki metodiki ekspress-analiza otsenki vliyaniya dobavok na prochnost' arbolita. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, (6), 71–76. URL: https://elb.psu.by/bitstream/123456789/2243/1/Бозылев_2009-6.pdf.

Поступила 17.11.2022

МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТОВ С ОРГАНИЧЕСКИМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ

А.Н. ЯГУБКИН, Ч. ЧЖИСЮЙ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Китайская строительная отрасль уже много лет использует Интернет вещей (IoT) для мониторинга строительных материалов и конструкций. Достижения китайской строительной отрасли в приложениях IoT могут быть использованы для изучения и мониторинга характеристик строительных материалов, в том числе зеленых зданий (энергоэффективных строительных материалов).

Цель исследования: изучение и оптимизация методов дистанционного контроля качества композитов с органическими заполнителями.

С помощью разработанной методики были получены следующие зависимости: зависимости напряжений внутри композитов с органическими заполнителями от внешних воздействий, полученные с помощью тонкопленочного датчика давления Keyes, зависимости деформаций внутри композитов с органическими заполнителями от внешних воздействий, полученные с помощью ультразвукового датчика перемещений, зависимости влажности внутри композитов с органическими заполнителями от внешних воздействий, полученные с помощью датчика влажности, зависимости реологии (время схватывания цементного теста), полученные с помощью датчика Ph-sensor.

Ключевые слова: интернет вещей, методы дистанционного контроля качества, композиты с органическими заполнителями.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 502.51(476)

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-82-88

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА
В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ БЕЛАРУСИ*д-р геогр. наук, проф. А.А. ВОЛЧЕК, М.А. ТАРАТЕНКОВА*
(Брестский государственный технический университет)

В статье дана оценка содержания растворенного кислорода в поверхностных водах Республики Беларусь на основе данных наблюдений за период с 1994 по 2019 гг. С использованием методов статистического моделирования определен закон распределения обеспеченности растворенного кислорода; представлена карта-схема пространственного распределения растворенного кислорода в поверхностных водах Беларуси. Количественная оценка растворенного кислорода охарактеризована градиентом изменения, распределение которого представлено на карте-схеме, и определено для каждого наблюдаемого створа.

Ключевые слова: растворенный кислород, поверхностные воды, статистическое моделирование, значимость.

Введение. Гидрохимический режим водотоков и водоемов – это сложный комплекс химических, физических и биологических процессов, которые протекают в определенных климатических, гидрологических, геологических условиях, а также под воздействием техногенного фактора. Последнее условие в настоящее время приобретает все большую значимость в процессе формирования качества поверхностных вод.

Содержание достаточного количества растворенного кислорода является одним из основных условий при оценке качества экологического состояния водотоков и водоемов. Снижение концентрации данного показателя до 1,5 мл/дм³ вызывает массовую гибель рыб и гидробионтов [1]. Это подтверждают и наши исследования, которые рассматривали дефицит растворенного кислорода в р. Лесная в конце летнего периода наблюдений, в который фиксировался массовый замор рыбы [2].

Для оценки качества воды водотоков и водоемов используется растворенный кислород, который является интегрированным показателем экологической системы, в настоящее время оценивается с помощью предельно-допустимой концентрации (ПДК) и составляет в подледный период не менее 6 мгО₂/дм³ для поверхностных водных объектов, используемых для размножения, нагула, зимовки, миграции видов рыб отрядов лососеобразных и осетрообразных, и не менее 4 мгО₂/дм³ для иных поверхностных водных объектов, в открытый период – не менее 8 и 6 мгО₂/дм³ соответственно¹.

Работы по исследованию содержания кислорода в водных объектах известны с конца XIX в. [3]. Механизмы взаимодействия кислорода между атмосферой и водой начали изучать в начале XX в. [4]. В статье С.И. Кузнецова и Г.С. Карзинкина разработаны методы количественной оценки потребления кислорода при разложении органических веществ в водной среде [5]. В это время появляется первая модель динамики содержания растворенного кислорода, которая является актуальной и по сей день [6]. Несколько позже появляются исследования по потреблению кислорода донными отложениями [7].

Во второй половине XX в. благодаря появлению полирографических датчиков стал возможен сбор массового материала, что позволило получить пространственно-временную структуру растворенного кислорода. При этом активно изучается кислородный режим уже существующих и создающихся водохранилищ Верхней Волги, Москворецкой системы, Иваньковское и определяющих его факторов². В конце 70-х гг. прошлого столетия начинают появляться первые концептуальные гидроэкологические модели, в которых присутствует переменная «растворенный кислород», в разработку которых значительный вклад внесли В.В. Меншуткин, А.В. Леонов.

Хотя кислород является одним из основных газов в составе поверхностных вод, его присутствие в воде обеспечивает жизнедеятельность большинства организмов, устойчивое функционирование естественных водных экологических систем, интенсивность химических и биологических реакций, а также способность водоемов и водотоков к самоочищению, проблема оценки растворенного кислорода далека от решения в части пространственного распространения по территории Беларуси.

Целью данной работы является оценка пространственно-временной структуры содержания растворенного кислорода в поверхностных водах Беларуси и его прогнозные тенденции в зависимости от преобладающих сценариев развития климата в будущем.

¹ Об установлении нормативов качества воды поверхностных водных объектов [Электронный ресурс]: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 26 мая 2017 г., № 16 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь. – Минск, 2017.

² Ерина, О.Н. Режим растворенного кислорода в стратифицированных водохранилищах Москворецкой системы водоснабжения г. Москвы : дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.27 / О.Н. Ерина. – М., 2015. – 188 с.

Основная часть. Обогащение поверхностных вод кислородом происходит за счет кислорода, находящегося в атмосфере. Возможен также и процесс поглощения кислорода атмосферой. Данный процесс происходит при определенной температуре и давлении до установления равновесия с парциальным давлением в атмосфере. Уравнение, описывающее процесс насыщения воды кислородом, имеет вид [8]:

$$\frac{dc}{dt} = k_2(C_s - C), \quad (1)$$

где C – наблюдаемая концентрация, мг/дм³;
 C_s – концентрация насыщения, мг/дм³;
 k_2 – коэффициент аэрации.

Также выделение кислорода происходит в ходе реакции фотосинтеза. Интенсивность фотосинтеза зависит от количества солнечного света, питательных веществ и температуры. На оба этих процесса влияют и гидрологические условия, что приводит к сезонной изменчивости содержания растворенного кислорода в поверхностных водах.

Непрерывное потребление растворенного кислорода происходит вследствие таких процессов, как дыхание микроорганизмов, разложение органических остатков и др. Так, например, поглощение кислорода дафниями (*Daphnia longispina*) на 1000 особей за 24 часа при температуре в 25°C составляет 6,57 мг О₂. С увеличением температуры происходит ускорение процессов гниения и брожения, что приводит к увеличению скорости поглощения кислорода в воде [8].

Колебание растворенного кислорода наблюдается и в течение суток. Амплитуда изменения концентрации кислорода в воде будет зависеть от интенсивности соотношения процессов, происходящих в воде. Так, его минимальная концентрация будет наблюдаться ранним утром, а максимальное – после полудня [8].

Особая роль в формировании кислородного режима отводится донным отложениям. В водотоках и водоемах постоянно происходит обмен растворенными и взвешенными веществами между водой и донными отложениями. Также кислород расходуется на химические и биологические процессы, происходящие на дне. Количество потребляемого кислорода будет зависеть от состава донных отложений, микроорганизмов, населяющих придонный слой, скорости течения придонного слоя, температуры воды, прозрачности водной толщи, глубины водотоков и водоемов и др.

Формирование кислородного режима для водоемов и водотоков будет различным, так как при формировании кислородного режима в водоемах ключевую роль играют гидрохимические, гидробиологические и гидрофизические показатели, а при том же процессе на водотоках – гидрологические.

Помимо естественных условий формирования кислородного режима все большую роль играет антропогенное воздействие. Основное влияние отводится сбросу в водотоки недостаточно очищенных сточных вод. Избыточное количество органических и химических веществ, попадающее в поверхностные воды, оказывает большую нагрузку на экосистему, а также снижает способность водоемов и водотоков к самоочищению.

Сточные воды являются основным источником потребления кислорода в речных водах, т.к. они разнообразны по своему качеству и количеству. Поэтому качество очистки сточных вод перед выпуском их в водоток является основным критерием благополучия речной экосистемы. Требуемая степень очистки рассчитывается исходя из местных условий водотока, в который планируется их дальнейший сброс.

В качестве исходного материала использованы статистические данные Государственного водного кадастра Республики Беларусь за период с 1994 по 2019 гг. по содержанию растворенного кислорода в воде по 43 створам (37 водотоков и 6 водоемов) и объемы сброса загрязняющих веществ по БПК₅ по бассейнам рек за период с 2000 по 2019 гг.³

Для оценки динамики содержания растворенного кислорода в поверхностных водах в основном использовались математические модели в виде линейных трендов, которые описывались уравнениями регрессии следующего вида:

$$y = ax + b. \quad (2)$$

Количественная оценка тенденции колебаний растворенного кислорода оценивалась градиентом, который численно равен коэффициенту регрессии (a), умноженному на 10 лет, т.е. $\alpha = a \cdot 10$ лет. Значимость коэффициента корреляции устанавливалась на 5%-ом уровне ($r_{кр} = 0,40$) [9].

Эмпирическая обеспеченность определялась по формуле:

$$p = \frac{m}{(n+1)} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где m – порядковый номер x в ранжированном ряду;
 n – длина ряда.

По показателю растворенный кислород построены эмпирические кривые обеспеченности, по которым подобран закон распределения обеспеченности. Соответствие эмпирического закона распределения обеспеченности

³ Государственный водный кадастр. Информационная система. URL: <http://178.172.161.32:8081/watstat/databasin/8d477e38-f153-40dc-8835-781a429385fe/>.

осуществлялось для логнормального распределения по критерию согласия χ^2 . Общий вид уравнения распределения плотности вероятности растворенного кислорода имеет вид:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{1}{\sigma_z x} f(u) = \frac{1}{\sigma_z x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), & x > 0. \end{cases} \quad (4)$$

Показатель растворенного кислорода является мерой потенциала большей части для окисления органических веществ. При рассмотрении пространственного распределения (рисунок 1) органических загрязнений по показателю БПК₅ наблюдается тенденция к увеличению сброса органических веществ, что будет сказываться и на кислородном режиме. Однако не только органические вещества являются потребителями кислорода в водотоках. Сброс химических веществ неорганического происхождения также ведет за собой процесс потребления кислорода. В последнее время (см. рисунок 1) распределение нагрузки по показателю БПК₅ по бассейнам рек носит разнонаправленный характер. В 2019 г. по сравнению с предыдущим годом произошло увеличение нагрузки на бассейн всех рек за исключением р. Неман. При этом, если увеличение удельного сброса органических веществ по показателю БПК₅ для бассейнов рек Западная Двина, Днепр и Западный Буг носят незначительный характер (сброс увеличился на 0,004; 0,001 и 0,001 единицы соответственно), то для бассейна реки Припять удельный сброс увеличился в 1,66 раз.

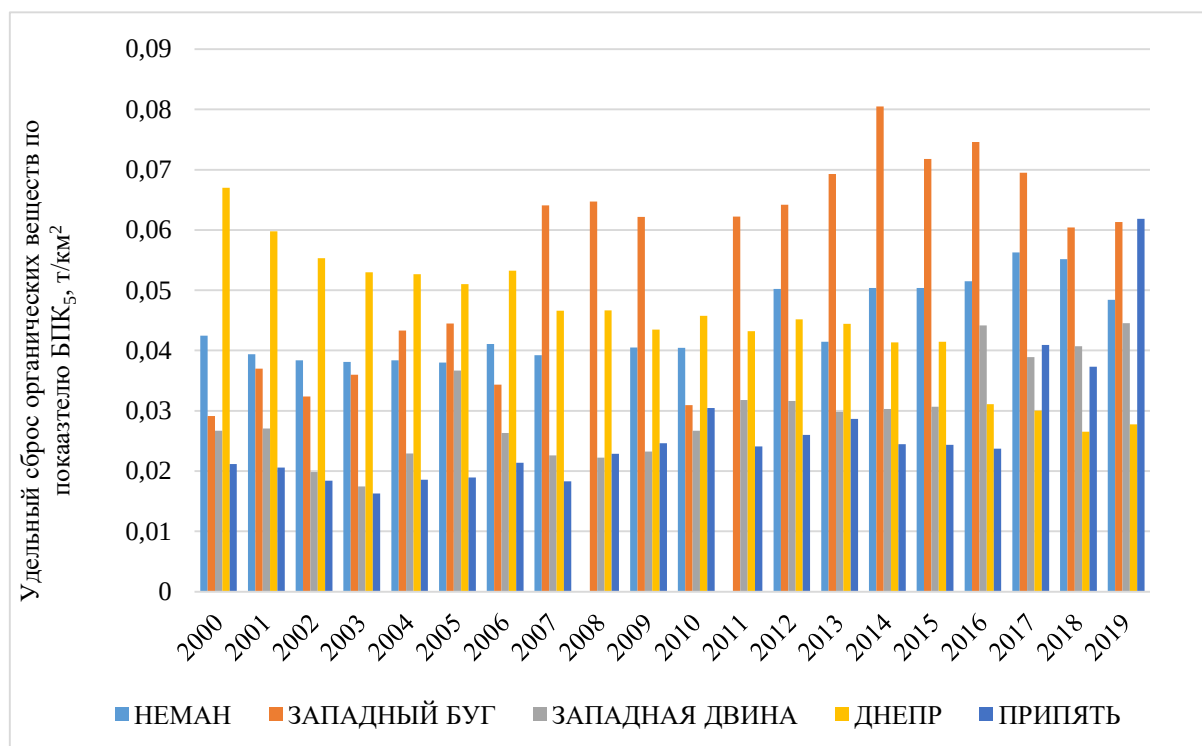


Рисунок 1. – Динамика сбросов загрязняющих веществ по показателю БПК₅

Пространственная картина среднего содержания растворенного кислорода в поверхностных водах Беларуси за период наблюдений с 1994 по 2019 гг. представлена на рисунке 2. В настоящее время среднегодовое содержание растворенного кислорода во всех наблюдаемых створах выше ПДК, что свидетельствует о благоприятной обстановке на реках республики. При рассмотрении пространственного распределения растворенного кислорода (см. рисунок 2) имеет место интенсивная нагрузка по органическим веществам на бассейны рек Западный Буг, Припяти и Днепра (в частности Березины).

По данным водного кадастра за 2019 г., высокую антропогенную нагрузку, связанную с поступлением сточных вод, имеют следующие створы: р. Свислочь (г. Минск – н.п. Королищевичи, н.п. Подлосье); р. Днепр (вблизи г. Могилева); р. Уза (ниже г. Гомель); р. Неман (ниже г. Гродно); р. Плисса (вблизи г. Жодино); р. Западный Буг (ниже г. Бреста); р. Уша (ниже г. Молодечно); р. Припять (вблизи г. Мозырь); р. Березина (ниже г. Светлогорска); р. Ясельда (ниже г. Березы); р. Мухавец (вблизи г. Кобрин); р. Морочь (вблизи н.п. Яськовичи). Приоритетными загрязняющими веществами и показателями в составе сбрасываемых сточных вод (имеющими наибольшие значения кратности превышения среднегодовых концентраций по отношению к ПДК для поверхностных водных объектов) для большинства бассейнов рек являются аммоний-ион, фосфат-ион, нитрит-ион, легкоокисляемые органические вещества (по БПК₅), железо общее. Эти данные подтверждаются и картой-схемой представлений на рисунке 2.

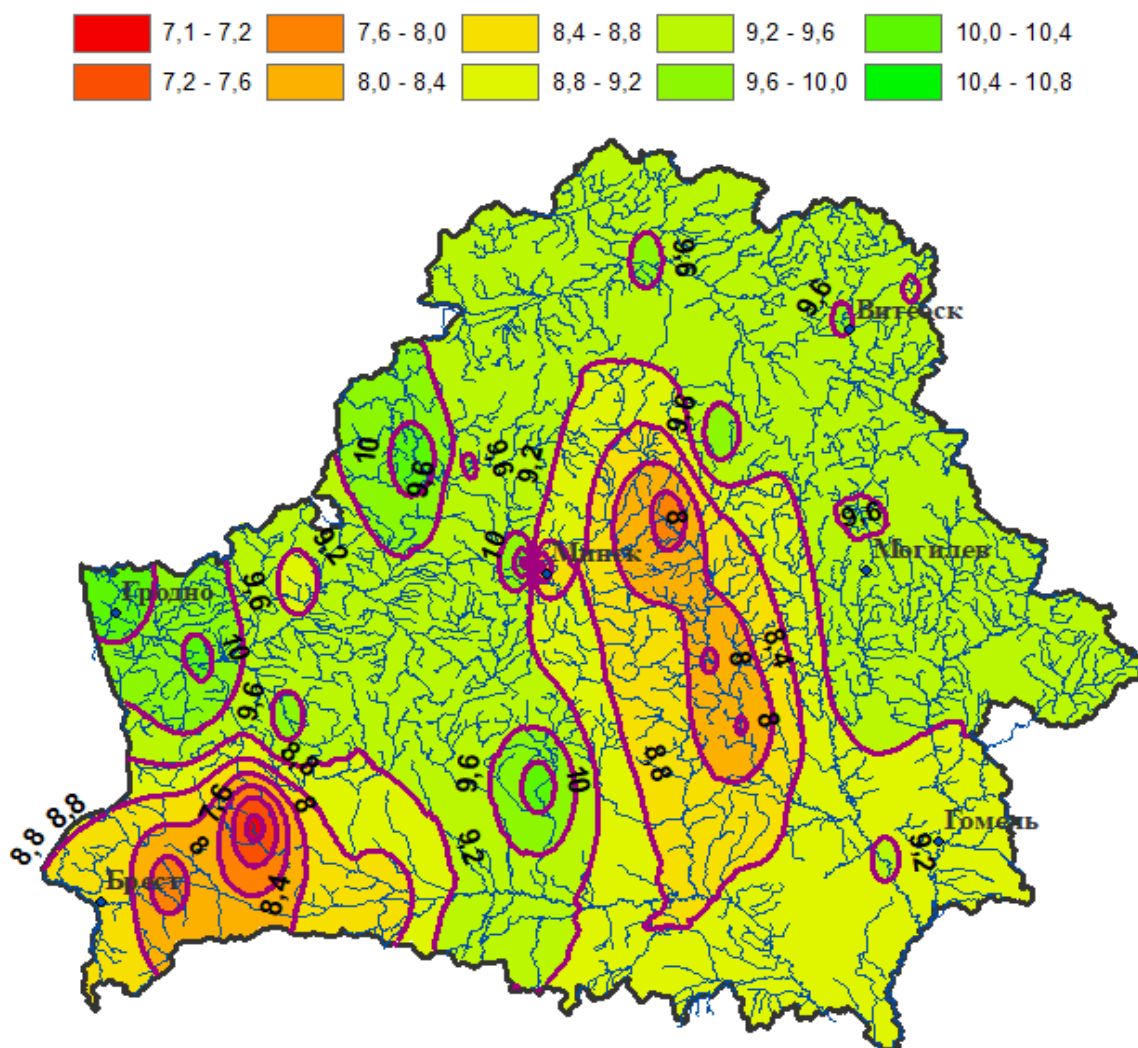


Рисунок 2. – Пространственная структура средних значений растворенного кислорода в водотоках и водоемах Беларуси, в $\text{мг O}_2/\text{дм}^3$

Тенденция снижения содержания растворенного кислорода имеет место почти во всех наблюдаемых створах, за исключением р. Мухавец в створах ниже г. Кобрин и г. Брест, р. Свислочь ниже г. Минска и оз. Нарочь в черте п. Нарочь, однако на этих участках коэффициенты корреляции являются не значимыми, поэтому о положительной динамике растворенного кислорода однозначно судить нельзя. Что касается остальных створов наблюдения, то из 39 створов с отрицательной тенденцией содержания растворенного кислорода на 19 створах коэффициенты корреляции являются значимыми (таблица 1). Также в таблице 1 с помощью подобранного закона распределения, представленного в виде уравнения (4), были рассчитаны обеспеченные величины 5% и 95% содержания растворенного кислорода по створам.

Таблица 1. – Основные статистические показатели содержания растворенного кислорода в поверхностных водах Беларуси за период с 1994 по 2019 гг.

Река-створ	Среднее значение, $\text{мг O}_2/\text{дм}^3$	Обеспеченные величины		Коэффициенты			
		5%	95%	вариации	асимметрии	регрессии	корреляции
1	2	3	4	5	6	7	8
р. Западная Двина 0,5 км выше пгт. Сураж	9,18	11,10	8,33	0,06	0,69	-0,010	-0,14
р. Западная Двина ниже г. Витебска	9,66	10,53	8,66	0,06	0,04	-0,052	-0,68
р. Западная Двина ниже г. Полоцка	9,53	10,69	8,32	0,07	-1,07	-0,053	-0,53

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
р. Западная Двина 15,5 км ниже г. Новополоцк	9,49	10,07	8,87	0,08	-1,20	-0,080	-0,69
р. Западная Двина ниже г. Верхнедвинска	9,17	9,61	8,72	0,07	-0,80	-0,029	-0,3
р. Полота в черте г. Полоцк	9,46	9,93	8,70	0,09	-0,93	-0,059	-0,51
р. Неман ниже г. Столбцы	9,52	9,87	8,80	0,07	0,08	-0,027	-0,29
р. Неман ниже г. Мосты	10,25	10,50	9,76	0,05	-0,15	-0,040	-0,58
р. Неман ниже г. Гродно	10,21	10,61	9,40	0,08	1,87	-0,085	-0,74
р. Лидея ниже г. Лида	9,15	9,72	8,56	0,09	0,45	-0,011	-0,10
р. Щара ниже г. Слоним	9,75	10,11	9,38	0,05	0,11	-0,039	-0,53
р. Россь ниже г. Волковыск	9,78	10,21	9,32	0,06	0,35	-0,055	-0,63
р. Вилия ниже г. Вилейка	9,82	10,52	9,08	0,10	0,27	-0,092	-0,63
р. Вилия на СВ от г. Сморгонь	10,41	11,03	9,75	0,09	0,55	-0,058	-0,45
р. Уша ниже г. Молодечно	9,36	10,14	8,50	0,12	0,58	-0,112	-0,68
р. Мухавец ниже г. Кобрин	7,94	8,59	7,24	0,10	0,89	0,029	0,08
р. Мухавец в черте г. Брест	8,70	9,11	8,27	0,06	-1,01	0,018	0,22
р. Днепр ниже г. Орша	9,42	10,06	8,75	0,10	1,51	-0,052	-0,38
р. Днепр ниже г. Шклов	9,60	10,16	9,02	0,09	0,70	-0,043	-0,37
р. Днепр ниже г. Могилев	9,42	9,89	8,93	0,07	0,95	-0,041	-0,42
р. Днепр ниже г. Быхов	9,55	10,13	8,95	0,09	0,96	-0,060	-0,49
р. Днепр ниже г. Речица	9,25	9,86	8,60	0,10	0,49	-0,014	-0,11
р. Днепр ниже г.п. Лоев	8,87	9,61	8,13	0,12	0,62	-0,075	-0,51
р. Березина ниже г. Борисов	7,70	8,31	7,06	0,10	-1,03	-0,007	-0,07
р. Березина ниже г. Бобруйск	8,07	8,75	7,34	0,10	-0,02	-0,033	-0,29
р. Березина ниже г. Светлогорск	8,88	9,58	8,14	0,11	-0,45	-0,073	-0,53
р. Плисса ниже г. Жодино	8,01	8,65	7,33	0,10	-0,73	-0,131	-0,48
р. Свислочь ниже г. Минск	7,84	8,35	7,30	0,08	-0,60	0,012	0,13
р. Свислочь в черте с. Свислочь	8,06	8,79	7,29	0,11	0,61	-0,031	-0,27
р. Сож ниже г. Кричева	9,47	9,99	8,97	0,08	0,03	-0,029	-0,27
р. Сож ниже г. Гомель	8,94	9,47	8,38	0,08	0,38	-0,028	-0,25
р. Ипуть ниже г. Добруш	9,13	9,72	8,52	0,09	0,29	-0,042	-0,34
р. Припять ниже г. Пинска	8,63	9,18	8,20	0,07	0,09	0,044	0,49
р. Припять ниже г. Мозыря	8,91	9,57	8,21	0,10	-0,63	-0,004	-0,03
р. Ясельда ниже г. Береза	7,05	7,58	6,49	0,09	-0,08	-0,031	-0,33
р. Горынь ниже г. Речица	9,34	9,97	8,67	0,09	-0,58	0,082	0,62
оз. Лукомльское от г. Новолукомль	9,81	-	-	0,07	-0,47	-0,060	-0,58
оз. Нарочь в черте п. Нарочь	9,50	-	-	0,09	-0,30	0,019	0,15
вдхр. Вилейское в черте г. Вилейка	9,08	-	-	0,07	-0,23	-0,022	-0,23
вдхр. Заславское, ГЭС Гонолес	10,56	-	-	0,14	-0,15	-0,013	-0,05
вдхр. Осиповичское на СЗ от г. Осиповичи	8,70	-	-	0,25	3,12	-0,055	-0,32
вдхр. Солигорское на ЮЗ от г. Солигорск	10,14	-	-	0,23	2,05	-0,050	-0,23
Среднее значение	9,17	-	-	0,09	0,17	-0,036	-0,29

Примечание. Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

В большинстве случаев коэффициент вариации не превышает 10% (исключение составляют три створа), что говорит о незначительной степени рассеивания данных и об их однородности. Коэффициент асимметрии показывает скос распределения данных, а знак – его направление. Исходя из данных таблицы 1 можно сделать вывод о том, что на 25 створах наблюдения распределение имеет скос вправо, на 18 – влево. Что же касается градации по значениям этих коэффициентов, то незначительная асимметрия наблюдается на 9 створах, умеренная асимметрия – также на 9 створах, существенная – на 25. При этом значение и знак коэффициента асимметрии для одной и той же реки могут быть различны на разных створах. Так, например, для реки Западная Двина по знаку коэффициента асимметрии можно сделать вывод, что на створах 0,5 км выше г.п. Сураж и ниже г. Витебска распределение скошено вправо, а на створах 15,5 км ниже г. Новополоцка, ниже г. Полоцка, ниже г. Верхнедвинска – влево. Что касается градации, то на створе ниже г. Витебска асимметрия распределения растворенного кислорода является незначительной, в то время как для всех остальных створов на реке Западная Двина – существенная.

Пространственная структура распределения градиентов среднегодовых концентраций растворенного кислорода в поверхностных водах Беларуси представлена на рисунке 3. Направление градиента свидетельствует о тенденции к снижению или увеличению содержания растворенного кислорода в поверхностных водах. Как видно из рисунка 3, наиболее интенсивное снижение содержания растворенного кислорода наблюдается в центральной части республики по бассейнам рек Неман и Днепр. На бассейне реки Западный Буг наблюдается тенденция роста содержания растворенного кислорода.

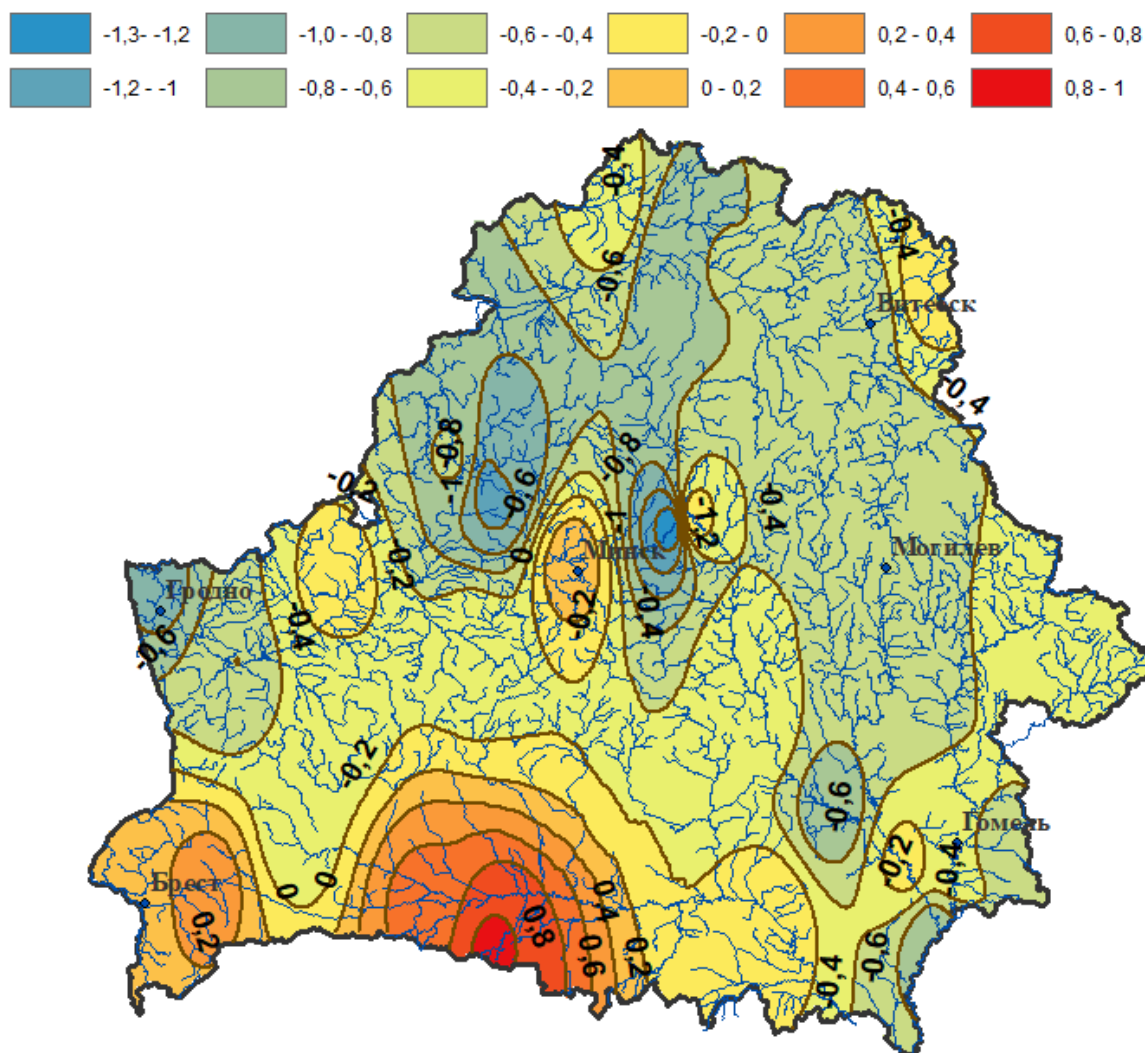


Рисунок 3. – Пространственная структура градиентов среднегодовых концентраций растворенного кислорода в поверхностных водах Беларуси

Заключение. В настоящее время среднегодовое содержание растворенного кислорода в поверхностных водах Беларуси составляет $9,17 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ и находится выше ПДК, который составляет в подледный период не менее $6 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ для поверхностных водных объектов, используемых для размножения, нагула, зимовки, миграции видов рыб отрядов лососеобразных и осетрообразных, и не менее $4 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ для иных поверхностных водных объектов, в открытый период – не менее 8 и $6 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ соответственно, что свидетельствует о благоприятной экологической обстановке на реках и водоемах Беларуси. Однако тенденция к увеличению сброса органических веществ в водотоки может изменить картину уже в ближайшем будущем. Основываясь на полученной карте-схеме пространственного распределения растворенного кислорода по территории Беларуси, следует, что бассейны рек Западный Буг, Припять и Днепр (в частности Березины) уже испытывают предельную нагрузку по органическим веществам. Это подтверждается и статистической значимостью полученных моделей: в большинстве исследуемых створов намечалась тенденция к снижению показателя растворенный кислород. Поэтому уже сейчас необходимо разработать мероприятия по снижению нагрузки на реки по органическим веществам, чтобы исключить снижение содержания растворенного кислорода и тем самым не допустить экологических рисков. В результате исследований впервые был выявлен тот факт, что распределение растворенного кислорода подчиняется логнормальному закону распределения. Это позволило определить этот параметр с обеспеченностью 5% и 95%, что может быть использовано в дальнейшем для обоснования водохозяйственных расчетов при проектировании сооружений водоснабжения и водоотведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вацова, А.С. Сезонные изменения концентраций биогенных веществ и содержания растворенного кислорода в реках Южного Приморья / А.С. Вацова // Изв. ТИНРО. – 2017. – Т. 191. – С. 210–222.
2. Волчек, А.А. Гидрохимический режим реки Лесная как индикатор состояния юго-западной части Беловежской пуши / А.А. Волчек, М.А. Таратенкова // Беловежская пуца. Исследования : сб. науч. ст. / редкол.: А.В. Бурый [и др.]. – Брест, 2018. – С. 195–209.

3. Winkler, L.W. Die Bestimmung des in Wasser Gelösten Sauerstoffes / L.W. Winkler // Ber. d. Deutsch. Chem. Gesellschaft. – 1888. – № 21 (2). – S. 2843–2855.
4. Adeney, W.E. The determination of the rate of solution of atmospheric nitrogen and oxygen by water / W.E. Adeney, H.G. Becker // Phil. Mag. – 1919. – Vol. 38, № 228. – P. 317–337.
5. Карзинкин, Г.С. Новые методы в лимнологии / Г.С. Карзинкин, С.И. Кузнецов // Тр. лимнологической станции в Косине. – 1932. – Вып. 13–14. – С. 47–67.
6. Rossolimo, L.L. Die Boden Gasausscheidung und das Sauerstoffregime der Seen / L.L. Rossolimo // Verh. int. Verein. Limnol. – 1935. – № 7. – S. 539–561.
7. Хатчинсон, Д. Лимнология / Д. Хатчинсон. – М. : Прогресс, 1969. – 592 с.
8. Никоноров, А.М. Гидрохимия / А.М. Никоноров. – СПб. : Гидрометеиздат, 2001. – 453 с.
9. Волчек, А.А. Трансформация качества поверхностных вод рек Беларуси / А.А. Волчек, Ан.А. Волчек // Вестн. БрГТУ, Водохозяйств. стр-во и теплоэнергетика. – 2006. – № 2. – С. 5–15.

REFERENCES

1. Vazhova, A.S. (2017). Sezonnye izmeneniya kontsentratsii biogennykh veshchestv i sodержaniya rastvorennogo kisloroda v rekakh Yuzhnogo Primor'ya. *Izvestiya TINRO*, 191, 210–222. (In Russ.).
2. Volchek, A.A. & Taratenkova, M.A. (2018). Gidrokhimicheskiy rezhim reki Lesnaya kak indikator sostoyaniya yugo-zapadnoi chasti Belovezhskoi pushchi. In A.V. Buryy (Eds.), V.M. Arnol'bik (Eds.), N.D. Cherkas (Eds.) & A.N. Bunevich (Eds.) *Belovezhskaya pushcha. Issledovaniya: sb. nauch. st. (195–209)*. Brest: Al'ternativa. (In Russ.).
3. Winkler, L.W. (1888). Die Bestimmung des in Wasser Gelösten Sauerstoffes. *Ber. d. Deutsch. Chem. Gesellschaft*, 21 (2), 2843–2855. (In German).
4. Adeney, W.E. & Becker, H.G. (1919). The determination of the rate of solution of atmospheric nitrogen and oxygen by water. *Phil. Mag*, 38 (228), 317–337.
5. Karzinkin, G.S. & Kuznecov, S.I. (1932). Novye metody v limnologii. *Tr. limnologicheskoi stantsii v Kosine*, (13–14), 47–67. (In Russ.).
6. Rossolimo, L.L. (1935). Die Boden Gasausscheidung und das Sauerstoffregime der Seen. *Verh. int. Verein. Limnol.*, (7), 539–561. (In German).
7. Khatchinson, D. (1969). *Limnologiya*. Moscow: Progress. (In Russ.).
8. Nikonorov, A.M. (2001). *Gidrokimiya*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. (In Russ.).
9. Volchek, A.A. & Volchek, An.A. (2006). Transformatsiya kachestva poverkhnostnykh vod rek Belarusi [Transformation of the quality of surface waters of rivers in Belarus]. *Vestnik BrGTU, Vodokhozyaistv. str-vo i teploenergetika* [Bulletin of BrGTU, Water management and thermal power engineering], (2), 5–15. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 22.09.2022

EVALUATION OF THE CONTENT OF DISSOLVED OXYGEN IN THE SURFACE WATER OF BELARUS

A. VOLCHEK, M. TARATENKOVA
(Brest State Technical University)

The article gives an estimate of the content of dissolved oxygen in the surface waters of the Republic of Belarus based on observational data for the period from 1994 to 2019. Using the methods of statistical modeling, the law of distribution of the provision of dissolved oxygen is determined; a schematic map of the spatial distribution of dissolved oxygen in the surface waters of Belarus is presented. The quantitative assessment of dissolved oxygen is characterized by a gradient of change, the distribution of which is presented on a map-scheme, and is determined for each observed site.

Keywords: dissolved oxygen, surface waters, statistical modeling, significance.

УДК 628.544

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-89-93

КОРРОЗИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В ДЕЗИНФИЦИРУЮЩИХ РАСТВОРАХ

А.В. ПОСПЕЛОВ¹, канд. хим. наук, доц. **И.В. МАЦУКЕВИЧ²**,
канд. хим. наук **А.А. КАСАЧ³**, **М.А. КОМАРОВ⁴**, **С.Н. РОЖКО⁵**
(Белорусский государственный технологический университет, Минск^{1, 3, 4},
ИОНХ НАН Беларуси, Минск², ИЖКХ НАН Беларуси, Минск⁵)
pospelov.ip@gmail.com¹, **irinavas.k1975@gmail.com²**, **kasach2018@bk.ru³**,
makkom1995@gmail.com⁴, **svetlana89rozhko@gmail.com⁵**

Дезинфекция различных поверхностей используется повсеместно в разных областях человеческой деятельности. Особую актуальность дезинфекция поверхностей приобрела в последние годы. Однако в процессе дезинфекции применяются растворы с высокими концентрациями действующих веществ. Наиболее распространенные вещества для дезинфекции – хлорсодержащие. Среди них наиболее часто используются гипохлориты натрия, кальция и хлорная известь. В процессе дезинфекции поверхностей происходит разрушение материалов обрабатываемых поверхностей. Это может приводить не только к миграции вымываемых металлов, но и к разрушению материалов и конструкций. В качестве альтернативного варианта дезинфицирующего вещества в статье рассмотрены растворы озона в воде. Озон активно используется для обеззараживания воды, однако для дезинфекции поверхностей он не нашел широкого применения. В статье исследовано коррозионное воздействие дезинфицирующих веществ на углеродистые стали Ст3 и 08. Для исследований использовали хлорсодержащие растворы в концентрации 2 мас.% в пересчете на гипохлорит ион и насыщенную озоном воду в качестве альтернативного варианта дезинфицирующего раствора. Результаты исследований показали, что наибольшее коррозионное воздействие на исследуемые нержавеющие стали оказывают хлорсодержащие растворы, среди которых, в свою очередь, наибольшее коррозионное воздействие оказывает раствор гипохлорита натрия. Использование насыщенной озоном воды характеризуется наименьшими значениями токов коррозии.

Ключевые слова: дезинфекция, углеродистые стали, коррозия.

Введение. Для дезинфекции поверхностей могут использоваться различные вещества. Обработка хлорсодержащими веществами с целью дезинфекции до сих пор используется во всем мире [1; 2]. В списке веществ, рекомендованных ВОЗ, наибольшую долю занимают хлорсодержащие вещества, среди которых значительную часть занимают растворы, содержащие гипохлорит натрия. Эффективность дезинфицирующих средств для инактивации различных видов микроорганизмов и вирусов оценивают по критерию С·Т (концентрация, умноженная на время), рекомендованному ВОЗ. Величина этих критериев зависит от вида дезинфицирующего средства, вида микроорганизмов, подлежащих инактивации, температуры и концентрации основного компонента и времени обработки [3]. Поскольку время обработки должно быть как можно короче, концентрация дезинфицирующего средства обычно высока. При обработке поверхностей высококонцентрированными растворами с целью дезинфекции происходит их разрушение [4–6]. В качестве альтернативы хлорсодержащим дезинфицирующим веществам рассматривается использование озона, растворенного в воде [7–9]. Озон активно используется для обеззараживания воды, однако для дезинфекции поверхностей он не нашел широкого применения. В ряде работ было показано, что несмотря на то, что озон является более сильным окислителем, чем гипохлорит ион, его использование не приводит к значительному разрушению материалов [4–6]. Это связано в первую очередь с очень низкими значениями критерия С·Т для озона в сравнении с хлорсодержащими реагентами. Эти различия достигают до 2000 раз для некоторых микроорганизмов. В нескольких работах проведен сравнительный анализ эффективности дезинфекции по ряду технических, экологических и экономических показателей¹ [10–13], показывающих целесообразность использования данного подхода.

Задачей данной работы было определить скорость коррозии углеродистых сталей Ст3 и 08, провести сравнительный анализ коррозионного воздействия хлорсодержащих веществ и насыщенной озоном воды на углеродистые стали.

Методология исследований. Для исследований выбраны углеродистые стали Ст3 и 08. Также для исследования были взяты растворы гипохлорита натрия, гипохлорита кальция, хлорамина Б и растворенного озона в воде. Исследуемая концентрация хлорсодержащих реагентов 2 мас.% активного хлора. Данные концентрации дезинфицирующих веществ широко используются на практике. Озон получали с использованием озонатора Pinus longaeva F1 (Китай). Концентрация озона на выходе составляла 1,0 г/м³, а скорость потока была 10 л/мин, в результате чего максимальная концентрация озона составляла 0,3 г/л в объеме 1 л после 30-минутной обработки, что соответствует минимальной рекомендуемой концентрации для дезинфекции поверхности.

¹ Романовский, В.И. Сравнительный анализ способов дезинфекции водозаборных скважин и сооружений водоснабжения / В.И. Романовский, Ю.Н. Бессонова // 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.

Электрохимические исследования проводили в стандартной трехэлектродной электрохимической ячейке на потенциостате/гальваностате Metrohm Autolab PGSTAT 302N. В рамках электрохимических исследований измеряли потенциал открытого контура в течение 30 мин, а также выполняли последующие измерения потенциодинамическим методом со скоростью 1 мВ/с с –200 до +1200 мВ.

Потерю массы образцов сталей 03 и 08 проводили после 24 часов нахождения образцов в растворах.

Морфологию поверхности и состав поверхности определяли до и после обработки с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOLJSM-5610LV, оснащенного системой химического микроанализа (ЭДС).

Основная часть. Потенциал открытого контура с течением времени измерялся в течение 30 минут для различных выбранных дезинфицирующих веществ (рисунок 1). Для всех исследуемых растворов потенциал открытого контура снижался с течением времени. Однако для стали 3 в воде и растворенном озоне в воде в течение нескольких минут наблюдалось увеличение потенциала, что, вероятно, связано с образованием оксидной пленки на поверхности исследуемых образцов. Наиболее низкие показатели потенциалов наблюдаются у хлорсодержащих растворов. Эта тенденция в наибольшей степени проявлялась для растворов гипохлорита натрия и кальция. По прошествии пяти минут потенциал стабилизировался в хлорсодержащих растворах. Похожие закономерности наблюдаются и на графиках потенциодинамических кривых (рисунок 2). Как следует из полученных данных, обработка хлорсодержащими дезинфицирующими веществами привела к самым высоким значениям плотности тока коррозии в сравнении с водой и насыщенной озонной водой. Наименьшую плотность токов коррозии показали стали в растворах озона $5,4 \cdot 10^{-8}$ и $5,0 \cdot 10^{-8}$ А/см² соответственно для стали 3 и 08. Данные значения близки к значениям плотности тока коррозии в водопроводной воде $3,5 \cdot 10^{-7}$ и $3,3 \cdot 10^{-7}$ А/см² соответственно для стали 3 и 08. Наибольшую плотность токов коррозии показали стали во всех хлорсодержащих растворах. При этом для растворов гипохлорита натрия они оказались максимальными $8,2 \cdot 10^{-5}$ и $5,6 \cdot 10^{-5}$ А/см² соответственно для стали 3 и 08. Таким образом, плотность тока коррозии при обработке озонном была в 1518 раз ниже по сравнению с обработкой в растворе гипохлорита натрия.

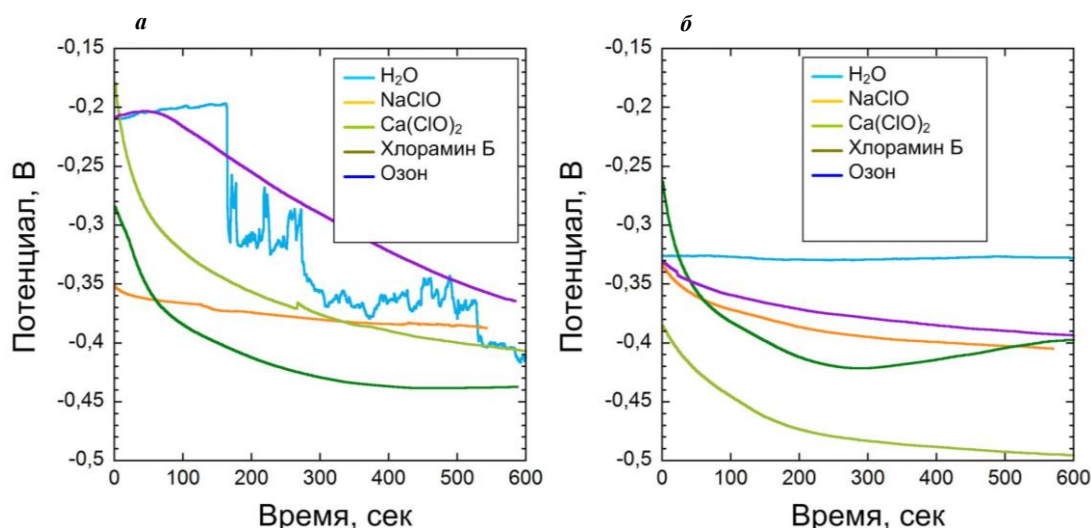


Рисунок 1. – Потенциал открытого контура для сталей Ст3 (а) и 08 (б) в исследуемых растворах

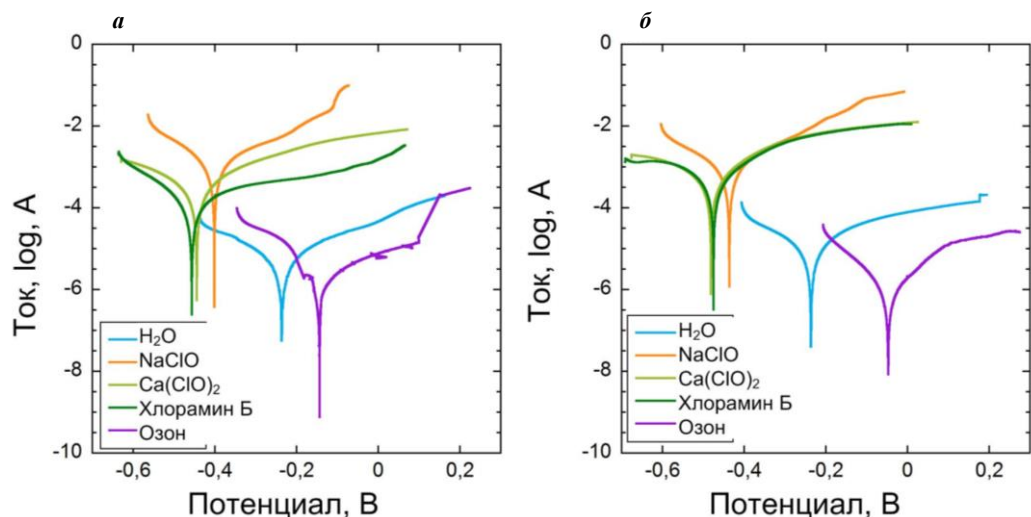


Рисунок 2. – Потенциодинамические кривые для сталей Ст3 (а) и 08 (б) в исследуемых растворах

Результаты эксперимента по потере массы также хорошо коррелируют с результатами электрохимических измерений. Сталь Ст3 показала большую потерю массы, скорость коррозии и долю скорродировавшей поверхности по сравнению со сталью 08, что можно объяснить меньшим содержанием углерода (в 2,4 раза) в Ст8. Эксперименты по потере массы показали снижение скорости коррозии со временем для всех испытанных условий. Максимальная скорость коррозии наблюдалась в первые 8 часов эксперимента. Потеря массы образцов уменьшалась в ряду $\text{Ca}(\text{ClO})_2 > \text{NaClO} > \text{Хлорамин Б} > \text{хлорная известь}$. В отличие от электрохимических измерений, наибольшая потеря массы и скорость коррозии была для растворов гипохлорита кальция. Вероятно, в данном случае существенное влияние оказывает эффект пассивации в растворе гипохлорита натрия с более высоким значением pH 9,02 в сравнении с pH раствора гипохлорита кальция 7,34. Также это можно объяснить образованием очагов коррозии при обработке $\text{Ca}(\text{ClO})_2$. Потеря массы и скорость коррозии для $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ в 2 раза выше по сравнению с раствором NaClO . Потеря массы в озонированной водопроводной воде была почти сравнима с потерей массы образцов в воде. В растворах NaClO , $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ и хлорной извести коррозия характеризуется наличием трещин, питингов. При использовании хлорамина Б коррозия характеризуется как равномерная, без трещин и питингов. На поверхности стали, обработанной хлорной известью, признаки коррозии носят более локальный характер в сравнении с гипохлоритом кальция и натрия (рисунок 3). В то же время можно сделать вывод, что хлорамин оказывает травящее действие на поверхность.

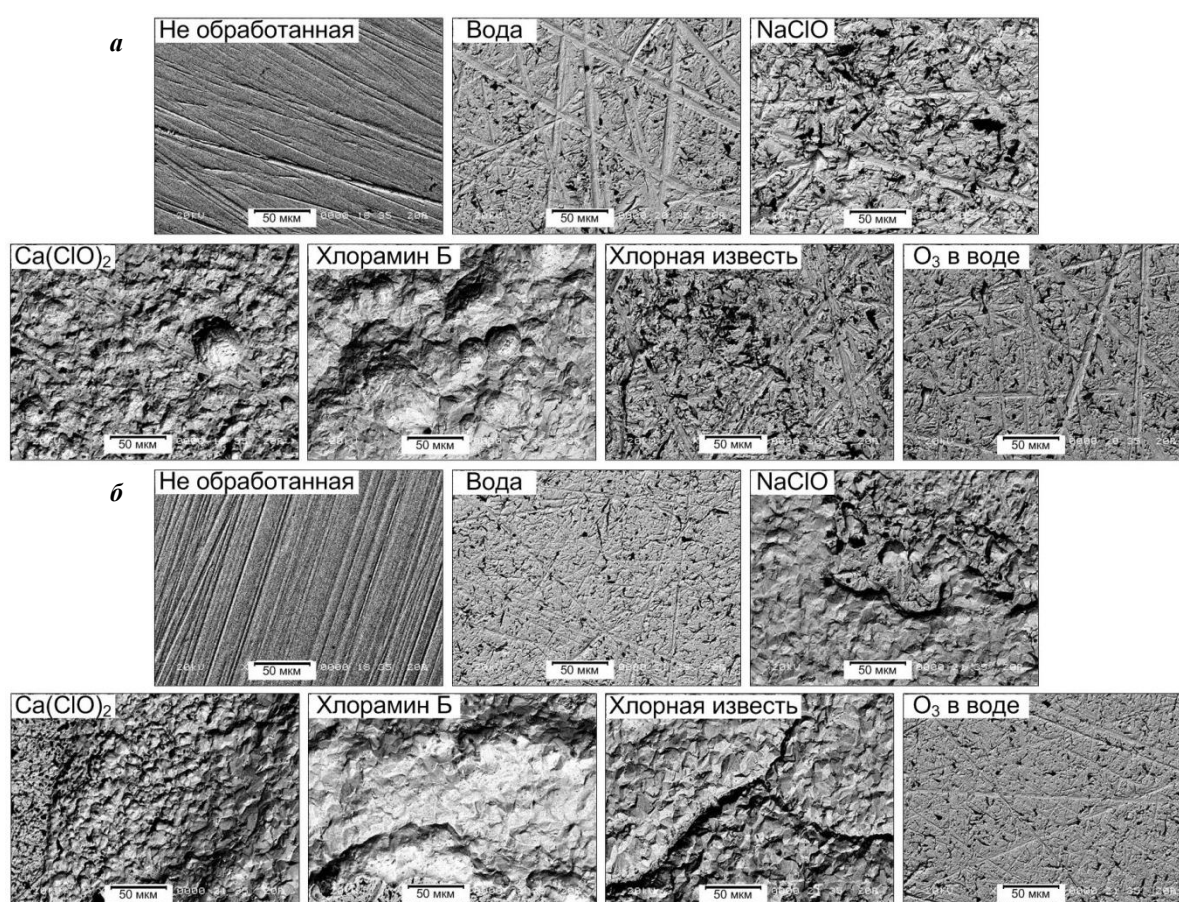


Рисунок 3. – Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности стали Ст3 (а) и 08 (б)

Выводы. В результате проведения исследований можно сделать выводы:

- при одинаковой концентрации активного хлора в исходном дезинфицирующем растворе по результатам электрохимических измерений наибольшее коррозионное воздействие на углеродистые стали оказывают растворы гипохлорита натрия, однако весовые измерения показали наибольшую потерю массы в растворах гипохлорита кальция, что, вероятно, связано с более высокими значениями pH раствора гипохлорита натрия и некоторой пассивацией поверхности сталей;
- насыщенный раствор озона по измеренным электрохимическим показателям близок по значениям к питьевой воде, при этом токи коррозии в растворе озона ниже, чем в воде.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорганомия», задания 2.1.02 «Сорбционные, каталитические и мембранные материалы для водоочистки и водоподготовки», НИР 5 «Физико-химические основы коррозии материалов в дезинфицирующих средах и разработка экологических и высокоэффективных способов дезинфекции» (2021–2023 гг.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Efficacy of different concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine in disinfection of contaminated Resilon cones / V. Zand [et al.] // *Medicina oral, patologia oral y cirugia buccal*. – 2012. – № 17 (2). – P. 352. DOI: 10.4317/medoral.17467.
2. The Disinfection Characteristics of Ebola Virus Outbreak Variants / B.W.M. Cook [et al.] // *Sci. Rep.* – 2016. – № 6. DOI: 10.1038/srep38293.
3. Gallandat, K. Surface cleaning and disinfection: Efficacy assessment of four chlorine types using *Escherichia coli* and the Ebola surrogate Phi6 / K. Gallandat, M.K. Wolfe, D. Lantagne // *Environmental Science & Technology*. – 2017. – № 51 (8). – P. 4624–4631. DOI: 10.1021/acs.est.6b06014.
4. Романовский, В.И. Коррозионная устойчивость стали 15 к дезинфицирующим растворам / В.И. Романовский, В.В. Жилинский // *Тр. БГТУ. Сер. Химия и технология неорган. в-в*. – 2015. – № 3 (176). – С. 29–34.
5. Романовский, В.И. Сравнительный анализ коррозионной устойчивости углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам электрохимическим методом / В.И. Романовский, В.В. Жилинский, Ю.Н. Бессонова // *Вестн. БрГТУ. Водохозяйств. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология*. – 2016. – № 2 (98). – С. 126–129.
6. Романовский, В.И. Коррозионная устойчивость углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам / В.И. Романовский, Ю.Н. Чайка // *Тр. БГТУ. Сер. Химия и технология неорган. в-в*. – 2014. – № 3 (167). – С. 47–50.
7. Hurynovich, A.D. Analiza efektywności kaskadowego generatora ozonu / A.D. Hurynovich, V.I. Romanovski, P. Wawrzyniuk // *Economia i środowisko*. – 2013. – № 1 (44). – S. 156–164.
8. Анализ эффективности дезинфекции сооружений питьевого водоснабжения с использованием хлорсодержащих дезинфицирующих средств и озона / В.И. Романовский [и др.] // *Вестн. БрГТУ. Водохозяйств. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология*. – 2015. – № 2 (92). – С. 68–71.
9. Дезинфекция озонem водозаборных скважин и трубопроводов систем питьевого водоснабжения / В.И. Романовский [и др.] // *Тр. БГТУ. Сер. Химия и технология неорган. в-в*. – 2013. – № 3 (159). – С. 55–60.
10. Романовский, В.И. Эффективность использования озона в технологии водоподготовки / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, П. Вавженюк // *Водоочистка*. – 2014. – № 2. – С. 66–70.
11. Определение основных параметров дезинфекции и обеззараживания озонem сооружений питьевого водоснабжения / В.И. Романовский [и др.] // *Тр. БГТУ. Сер. Химия и технология неорган. в-в*. – 2015. – № 3 (176). – С. 108–112.
12. Романовский, В.И. Сравнительный анализ эффективности дезинфекции сооружений водоснабжения дезинфицирующими растворами / В.И. Романовский, И.В. Рымовская, С. Янь Фэн // *Вода Magazine*. – 2015. – № 10 (98). – С. 18–21.
13. Гуринович, А.Д. Эффективность дезинфекции озонem сооружений систем водоснабжения / А.Д. Гуринович, В.И. Романовский, Ю.Н. Бессонова // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. – 2016. – № 10. – С. 48–51.

REFERENCES

1. 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), 352. DOI: 10.4317/medoral.17467.
2. Cook, B.W.M., Cutts, T.A., Nikiforuk, A.M., Leung, A., Kobasa, D. & Theriault, S.S. (2016). The Disinfection Characteristics of Ebola Virus Outbreak Variants. *Sci. Rep.*, (6). DOI: 10.1038/srep38293.
3. Gallandat, K., Wolfe, M.K. & Lantagne, D. (2017). Surface cleaning and disinfection: Efficacy assessment of four chlorine types using *Escherichia coli* and the Ebola surrogate Phi6. *Environmental Science & Technology*, 51 (8), 4624–4631. DOI: 10.1021/acs.est.6b06014.
4. Romanovskii, V.I. & Zhilinskii, V.V. (2015). Korrozionnaya ustoichivost' stali 15 k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of steel 15 to disinfectant solutions]. *Tr. BGTU. Ser. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v* [Proceedings of BSTU. Series Chemistry and technology of inorganic substances], 3 (176), 29–34. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Romanovskii, V.I., Zhilinskii, V.V. & Bessonova, Y.N. (2016). Sravnitel'nyi analiz korrozionnoi ustoichivosti uglerodistykh staley k dezinfitsiruyushchim rastvoram elektrokhimicheskim metodom [Comparative Analysis of the Corrosion Resistance of Carbon Steels to Disinfecting Solutions by the Electrochemical Method]. *Vestn. BrGTU. Vodokhozyaistv. str-vo, teploenergetika i geoekologiya* [Bulletin of BrGTU. Water management construction, thermal power engineering and geoecology], 2 (98), 126–129. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Romanovskii, V.I. & Chaika, Y.N. (2014). Korrozionnaya ustoichivost' uglerodistykh staley k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of carbon steels to disinfectant solutions]. *Tr. BGTU. Ser. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v* [Proceedings of BSTU. Series Chemistry and technology of inorganic substances], 3 (167), 47–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Gurinovich, A.D., Romanovskii, V.I. & Wawrzyniuk, P. (2013). Analiza efektywności kaskadowego generatora ozonu. *Economia i środowisko*, 1 (44), 156–164. (In Polish).
8. Romanovskii, V.I., Rymovskaya, M.V., Bessonova, Y.N., Kovalevskaya, A.M. & Likhavitskaya, V.V. (2015). Analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii pit'evogo vodosnabzheniya s ispol'zovaniem khlorosoderzhashchikh dezinfitsiruyushchikh sredstv i ozona [Analysis of the effectiveness of disinfection of drinking water supply facilities using chlorine-containing disinfectants and ozone]. *Vestn. BrGTU. Vodokhozyaistv. str-vo, teploenergetika i geoekologiya* [Bulletin of BrGTU. Water management construction, thermal power engineering and geoecology], 2 (92), 68–71. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Chaika, Y.N. & Vavzhenyuk, P. (2013). Dezinfektsiya ozonom vodozabornykh skvazhin i truboprovodov sistem pit'evogo vodosnabzheniya [Ozone disinfection of water wells and pipelines of drinking water supply systems]. *Tr. BGTU. Ser. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v* [Proceedings of BSTU. Series Chemistry and technology of inorganic substances], 3 (159), 55–60. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D. & Vavzhenyuk, P. (2014). Effektivnost' ispol'zovaniya ozona v tekhnologii vodopodgotovki [Efficiency of using ozone in water treatment technology]. *Vodoochistka* [Water treatment], (2), 66–70. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Romanovskii, V.I., Likhavitskaya, V.V., Rymovskaya, M.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 facilities]. *Tr. BGTU. Ser. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v* [Proceedings of BSTU. Series Chemistry and technology of inorganic substances], 3 (176), 108–112. (In Russ., abstr. in Engl.).

12. Romanovskii, V.I., Rymovskaya, M.V. & Yan' Fen, S. (2015). Sravnitel'nyi analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii vodosnabzheniya dezinfitsiruyushchimi rastvorami [Comparative analysis of the efficiency of disinfection of water supply facilities as disinfectants]. *Voda magazine [Water magazine]*, 10 (98), 18–21. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Gurinovich, A.D., Romanovskii, V.I. & Bessonova, Y.N. (2016). Effektivnost' dezinfektsii ozonom sooruzhenii sistem vodosnabzheniya [Efficiency of ozone disinfection of structures of water supply systems]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie [Water treatment. Water treatment. Water supply]*, (10), 48–51. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 15.11.2022

CORROSION OF CARBOT STEELS IN DISINFECTANT SOLUTIONS

A. POSPELOV¹, I. MATSUKEVICH², A. KASACH³, M. KOMAROV⁴, S. ROZHKO⁴
(*Belarusian State Technological University, Minsk^{1, 3, 4},
IGIC NAS of Belarus, Minsk², IHCS NAS of Belarus, Minsk⁵*)

Disinfection of various surfaces is used everywhere in different areas of human activity. Disinfection of surfaces has gained particular relevance in recent years. However, in the process of disinfection, solutions with high concentrations of active substances are used. The most common substances used for disinfection are those containing chlorine. Among them, sodium hypochlorites, calcium hypochlorites, and bleach are most commonly used. In the process of surface disinfection, the materials of the treated surfaces are destroyed. This can lead not only to the migration of leached-out metals but also to the destruction of materials and structures. As an alternative disinfectant, the article considers ozone solutions in water. Ozone has found widespread use for water disinfection, but it has not found wide application for surface disinfection. The article investigated the corrosive effect of disinfectants on carbon steels St3 and 08. For research, chlorine-containing solutions were used at a concentration of 2 wt.% in terms of hypochlorite ion and ozone-saturated water as an alternative disinfectant solution. The research results showed that chlorine-containing solutions have the greatest corrosive effect on the studied stainless steels, among which the sodium hypochlorite solution has the greatest corrosive effect. The use of ozone-saturated water is characterized by the lowest values of corrosion currents.

Keywords: disinfection, carbon steels, corrosion.

УДК 550.831:550.835:662.02

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-94-101

**МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ
(НА ПРИМЕРЕ ЕКАТЕРИНБУРГСКОГО МЕГАПОЛИСА)**

д-р геол.-минерал. наук, проф. В.В. ФИЛАТОВ
(Владимирский государственный университет)
канд. геол.-минерал. наук, доц. К.В. ВАНДЫШЕВА
(Уральский государственный горный университет, Екатеринбург)

Виды и качественно-количественная характеристика техногенных явлений на существенно урбанизированной территории в значительной мере определяются не только техногенной нагрузкой, но главным образом еще и тем, что из себя представляет земная кора в пределах этой территории в геологическом, структурно-тектоническом, геоморфологическом, инженерно-геологическом, динамическом и иных естественных (т.е. природных) отношениях. На территории одного из крупнейших в России Екатеринбургского мегаполиса площадью более 1000 км² и имеющей сложный рельеф поверхности земли проживает около 1,5 млн человек, находится огромное количество гигантских промышленных предприятий различного производственного назначения, метрополитен, четыре водохранилища-пруда. Следовательно, уровень техногенной нагрузки на геологическую среду здесь очень высок. Поэтому актуальной в научно-практическом и социально-экологическом отношениях является задача изучения ее естественного динамического состояния с целью последующего прогнозирования в ее пределах негативных динамических событий в виде техногенных землетрясений, горных ударов и т.п. Решению этой задачи посвящена настоящая статья. В содержательно-методическом отношении изучение естественного динамического состояния территории мегаполиса заключается в рассмотрении и анализе таких важнейших факторов, как: геологическое и структурно-тектоническое строение геологической среды, ее сейсмичность, характер современных движений поверхности земли и естественное напряженно-деформированное состояние, обусловленное тектонической и гравитационной (плотностной неоднородностью геологической среды) силами.

Ключевые слова: урбанизация, техногенез, геологическая среда, сейсмичность, современные движения поверхности земли, естественное поле напряжения, территория Екатеринбургского мегаполиса.

Введение. Одним из важнейших следствий урбанизации является техногенез, представляющий собой совокупность геоморфологических процессов, обусловленных производственной деятельностью человека. В результате техногенеза происходит нарушение естественного равновесного состояния геологической среды, восстановление которого сопровождается различными по интенсивности разрушительными динамическими событиями. В значительной мере эти события чаще всего наблюдаются в горно-промышленных районах, в районах крупных мегаполисов и агломераций. Поэтому проблема изучения техногенеза урбанизированных территорий имеет не только актуальное научное, но, что существенно, практическое и социально-экологическое значение. Техногенные явления реализуются в определенной геологической обстановке, которая характеризуется своим структурно-тектоническим строением, динамическим режимом и другими свойствами, оказывающими влияние на форму техногенных процессов. Следовательно, для изучения и прогнозирования техногенных событий необходимо, прежде всего, принимать во внимание особенности геологического строения и характер динамического состояния и режима исследуемой урбанизированной территории. Кроме того, поскольку геологическая среда, как известно, имеет иерархическое строение и, следовательно, иерархические свойства, то ее изучение для оценки различных явлений тектоногенеза необходимо осуществлять на различных масштабных уровнях: по крайней мере на двух, на региональном и на локальном.

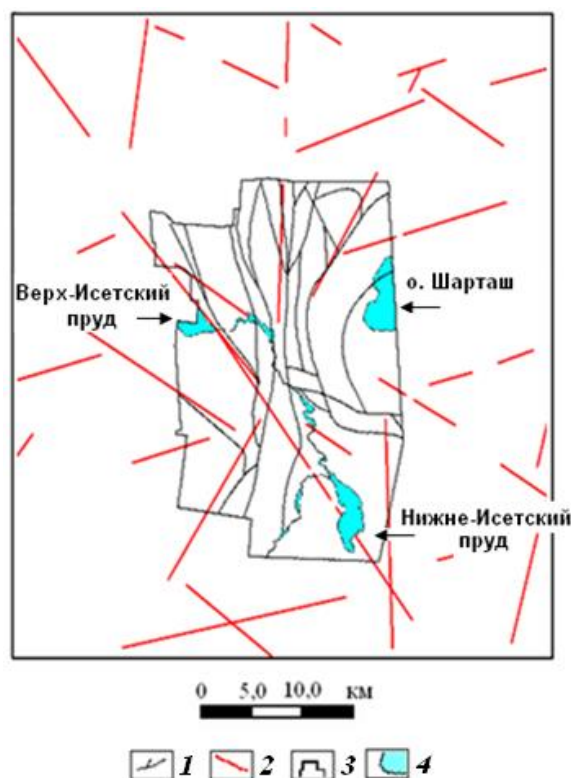
Краткое геологическое и структурно-тектоническое описание строения геологической среды мегаполиса [1]. Территория мегаполиса расположена в пределах Восточно-Уральского поднятия: западная и центральная части мегаполиса находятся в пределах Свердловского синклиория, а восточная – в пределах Монетнинско-Седельниковского антиклиория. Синклиорий сложен в основном осадочно-вулканогенными породами нижнесилурийского возраста; антиклиорий – метаморфизованными до зеленых сланцев и амфиболитов вулканогенными породами основного состава предположительно верхнего ордовика и различными сланцами нижнесилурийского возраста.

Геологическое и структурно-тектоническое строение территории мегаполиса характеризуется двумя важными особенностями:

- в пределах мегаполиса широко развиты разнообразные по возрасту, составу и формационной принадлежности интрузивные массивы: 1) позднедевонские массивы габбровой формации – Уктусский, Шуваяшский и Ширококореченский; 2) позднепалеозойские массивы гранитоидной формации – Верх-Исетский, Шарташский и Свердловский сателлит Верх-Исетского батолита;
- геологическая среда мегаполиса представляет собой структуру, состоящую из большого числа разломов различного ранга, ориентировок и кинематических типов, образующих тектонический узел, центр которого расположен между Свердловским и Шарташским гранитными массивами; в этом узле находится большая часть мегаполиса (рисунк 1).

Сейсмичность. Инструментальные сейсмические наблюдения на Среднем Урале были начаты 4 октября 1913 г. Характеристика сейсмических событий, произошедших с этого времени по 2002 г., приведена в последнем по времени издания каталоге [2]. Характеристика сейсмичности, приведенная в [2; 3], является реальной. Она отличается от сейсмичности, указываемой на картах общего сейсмического районирования территории СССР или РФ [4; 5]. Эту сейсмичность следует называть виртуальной. Для Среднего Урала ее величину определяют для строительства в 6 баллов, а для особо важных объектов повышают до 8 баллов (по шкале МСК-64), что соответствует магнитуде равной 5 и 6. Такова региональная оценка сейсмичности Среднего Урала.

Сейсмичность территории Екатеринбургского мегаполиса, или локальная сейсмичность, существенно скуднее, чем региональная: 24 сентября 1996 г. в северо-западном пригороде мегаполиса в районе о. Мелкое было зарегистрировано сейсмическое событие магнитудой около 1; 10 октября 1997 г. такое же по магнитуде событие было зарегистрировано в юго-западном пригороде мегаполиса в 3-4 км южнее г. Арамилы. Оба события по своей природе являются техногенными, а их очаги – приповерхностными. Таких событий ежегодно в мире происходит более одного миллиона.



1 – разломы (по геологическим данным); 2 – линейменты, отождествляемые с разломами (по геофизическим данным); 3 – контур г. Екатеринбурга; 4 – водоемы на территории г. Екатеринбурга

Рисунок 1. – Часть тектонической схемы района Екатеринбурга

Современные движения дневной поверхности. Экспериментальной основой для изучения современных движений дневной поверхности служат результаты повторных высокоточных нивелировок.

Региональная характеристика современных движений земной поверхности Среднего Урала была изучена путем проведения повторного высокоточного нивелирования по сети профилей, совмещенных с линиями крупных автомобильных и железных дорог, с 1925 по 1980 гг. при среднем расстоянии между пунктами измерения около 7 км [6]. По результатам нивелирования были вычислены горизонтальные градиенты скоростей вертикальных движений как годовые изменения превышений реперов в миллиметрах на 1 км хода по линиям повторного нивелирования, а также величины деформации сдвига и дилатации.

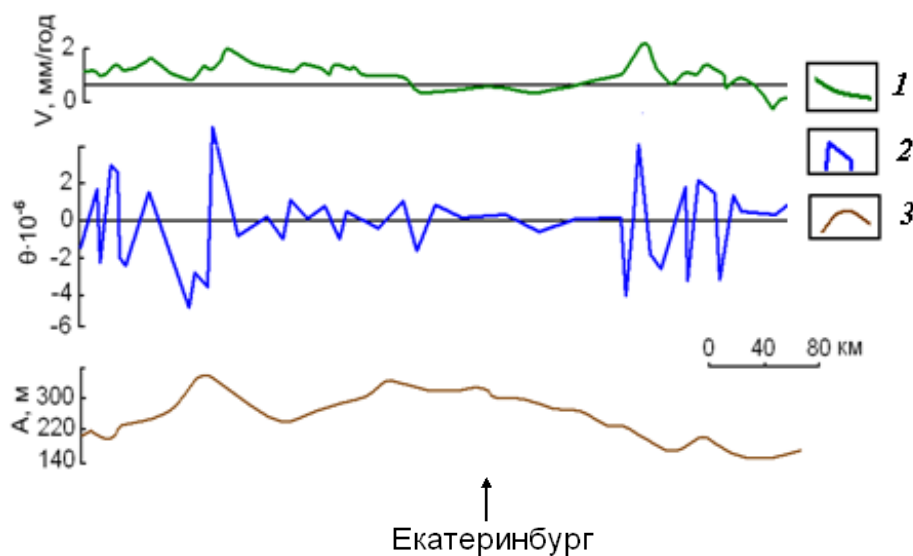
Из анализа результатов нивелирования следует, что по величине и знаку горизонтальный градиент скорости и деформация сдвига и дилатации существенно дифференцированы. Это позволяет сделать вывод о том, что земная кора Среднего Урала разбита на блоки различных рангов (размеров), границами которых являются глубинные разломы, а также разломы более высоких рангов [7]. Наиболее отчетливо связь аномальных значений горизонтальных градиентов и деформации проявляется с системами меридиональных и широтных по простиранию глубинных разломов, которые являются наиболее активными на современном этапе тектоногенеза, поскольку ориентировка разломов соответствует ориентировке главных осей современного поля напряжения [8].

Сопоставление планового положения осевых линий разломов и точек с экстремальными значениями горизонтальных градиентов скоростей и деформаций показало, что в зонах разломов находится около 80% аномалий градиентов и около 84% аномалий деформаций. Это совпадение – следствие повышенной тектонической мобильности (динамической активности) зон глубинных разломов; узлы пересечения разломов различных рангов и различных ориентировок являются самыми активными.

Повышенная тектоно-динамическая активность свойственна как глубинным разломам, так и разломам более высоких рангов. Индикаторами этой активности служат различные трубопроводы, точнее аварии на них. В^{1, 2, 3} [9] показаны результаты изучения этого явления и отмечено, что около 80% аварий на магистральных трубопроводах приходится на места их пересечения с зонами тектонических нарушений. Таким местам присуща высокая вероятность их повторяемости: для двухкратных – 0,75–0,80, для трехкратных и более – 0,95.

Ширина области динамического влияния разломов высоких рангов оценивается в 100–500 м. Поэтому аварии трубопроводов происходят на локальных участках. Тензометрическими измерениями установлено, что максимальное напряжение, которое испытывает материал трубы, составляет 80–120 МПа, что соответствует деформации растяжения в 99 мм на базе измерения равной 500 м. Относительная деформация, вызываемая такими напряжениями, составляет $2 \cdot 10^{-4}$, т.е. и напряжение, и деформация далеки от тех значений, при которых происходит разрушение трубы. Труба разрушается только под действием многократных нагрузок.

Региональное изучение современных движений в районе Екатеринбургского мегаполиса было выполнено вдоль профиля глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ): Ижевск – Красноуфимск – Полевской – Ишим (рисунок 2). Район мегаполиса характеризуется отрицательной скоростью движений поверхности земли менее 0,3 мм/год и знакопеременной дилатацией от $+0,3 \cdot 10^{-6}$ до $-0,7 \cdot 10^{-6}$, т.е. величина скорости и величина дилатации сопоставимы с погрешностью их измерения, поэтому их можно считать нулевыми. Таким образом, тот блок земной коры, в пределах которого находится мегаполис, следует рассматривать в региональном плане как устойчивый и консолидированный. Скорость движения и деформация в соседних блоках существенно выше. Поэтому современные движения как фактор, способствующий нарушению динамического равновесия геологической среды в районе мегаполиса, следует рассматривать малозначимым. Об этом же свидетельствуют и неотектонические данные (рисунок 3): вершинная доорогенная поверхность выравнивания на Среднем Урале представляет очень пологое поднятие, не нарушенное разломами, а мегаполис находится восточнее области, охваченной новейшими горообразовательными процессами [10].



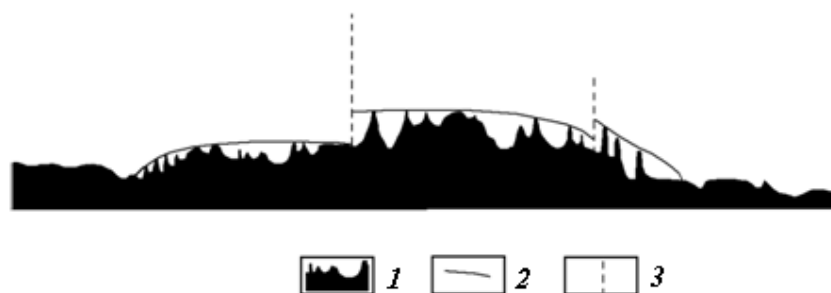
1 – скорость современных вертикальных движений;
2 – накопленные значения дилатации; 3 – рельеф поверхности Земли

Рисунок 2. – Деформации земной коры и их характеристика по Свердловскому профилю ГСЗ

¹ Кострюкова, Н.К. Динамика приливных деформационных процессов в локальных разломах земной коры в связи с безаварийной работой продуктопроводов / Н.К. Кострюкова, О.М. Кострюков // Геомеханика в горном деле – 2000 : докл. Междунар. конф., Екатеринбург, 2000 г. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2000. – С. 295–305.

² Панжин, А.А. Непрерывный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности с применением комплексов спутниковой геодезии GPS / А.А. Панжин // Геомеханика в горном деле – 2000 : докл. Междунар. конф., Екатеринбург, 2000 г. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2000. – С. 320–324.

³ Сашурин, А.Д. Геофизические исследования земной коры при оценке аварийности Красноуфимского участка многониточного газопровода / А.Д. Сашурин, А.А. Кошкарлов, В.В. Копырин // Горная геофизика : Междунар. конф., С.-Петербург, Россия, 22–25 июля 1998 г. – СПб. : ВНИИ, 1998. – С. 329–333.



1 – рельеф поверхности Земли; 2 – линия вершинной поверхности рельефа;
3 – предполагаемые зоны разломов, нарушающих положение вершинной поверхности

Рисунок 3. – Профиль деформаций вершинной (неоген-четвертичной) поверхности Среднего Урала

Характер современных движений земной поверхности в пределах мегаполиса, т.е. на локальном уровне, был изучен по результатам повторных нивелировок в 28 пунктах [11]. По этим данным были установлены следующие пространственно-временные закономерности современных движений:

- для годичных интервалов измерения величина скорости современных движений составляет первые мм/год;
- для временных интервалов измерения в несколько десятков лет величина скорости почти на порядок меньше и составляет первые десятые и даже сотые доли мм/год; кроме того, скорость движения остается практически постоянной как во времени, так и в пространстве;
- для обоих интервалов измерения скорости движения могут быть как положительными, так и отрицательными; инверсия знака скорости происходит на небольших расстояниях в десятки и первые сотни м.

Естественное напряженное состояние. Основные закономерности естественного напряженного состояния верхней части земной коры Среднего Урала были установлены на основании результатов их измерения в горных выработках эксплуатируемых месторождений полезных ископаемых [12; 13]. Причинами напряженного состояния являются действия литостатического давления и тектонической силы. Горизонтальные напряжения тектонической силы в 10–15 раз превосходят горизонтальные компоненты напряжения, что обусловлено литостатическим давлением; вертикальная компонента напряжения, вызываемая литостатической нагрузкой и тектонической силой, примерно одинаковы; широтные горизонтальные напряжения являются сжимающими, меридиональные бывают как растягивающими, так и сжимающими; на глубинах в первые сотни метров горизонтальные сжимающие напряжения могут достигать 50 МПа; с глубиной все компоненты напряжения возрастают по линейному закону. Наибольшие по величине широтные сжимающие напряжения наблюдаются от широты г. Екатеринбурга до широты г. Челябинска. Концентрация напряжений в этом районе генетически обусловлена воздействием Уфимского выступа Русской платформы на породы палеозойского возраста складчатого Урала. Давление этого выступа привело к развитию глубинных сдвигов с преимущественным горизонтальным смещением блоков земной коры при небольшой амплитуде подвижек в вертикальном направлении.

Таковы региональные закономерности естественного поля напряжения. Они обусловлены тектоническими структурами первого порядка. Поэтому следует полагать, что в первом приближении район мегаполиса находится под действием постоянного по величине и по знаку естественного напряжения. На это поле напряжения как на фон накладывается напряжение, которое обусловлено плотностной неоднородностью геологической среды [11].

Деформационное состояние геологической среды мегаполиса по геологическим данным и по данным тектонофизического анализа гравитационного поля. Анализ данных^{4,5} [1; 11] указывает на то, что участок земной коры, на котором расположен мегаполис, образует крупный тектонический узел. Данный участок имеет многочисленные тектонические нарушения различных рангов, ориентировки в пространстве и кинематических типов.

Тектонические нарушения узловых структуры мегаполиса были активизированы в палеозое и омоложены в мезо-кайнозойское время, имеют субмеридиональную, широтную и диагональную (северо-западную и северо-восточную) ориентировки. Значительная часть является активной и на современном этапе тектоногенеза, что способствует возникновению аварий на линиях подземных коммуникаций⁶.

Субмеридиональные разломы различных рангов на территории мегаполиса в кинематическом отношении представляют собой структуры сжатия и являются в основном взбросо-надвидами. Субширотные разломы – это структуры растяжения, а диагональные разломы имеют сколовый тип.

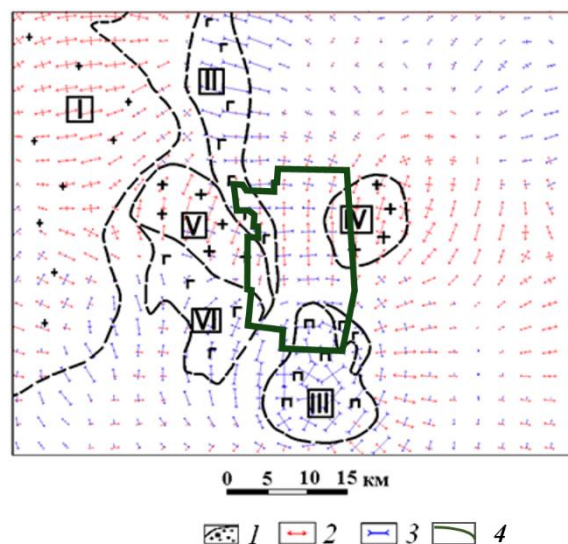
⁴ Геологическое доизучение масштаба 1:200000 и подготовка к изданию Госгеолкарты – 200 (новая серия) листов О-41-XXV и О-41-XXXI Среднеуральской серии (Ольховская площадь) : отчет Ольховской ГСП за 1991–1999. Кн. 1. Текст / В.Ф. Копанев [и др.]. – Екатеринбург : Уралгеолфонд, 1999. – 282 с.

⁵ Кузовков, Г.Н. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Среднеуральская. Лист О-41-XXV / Г.Н. Кузовков, Д.А. Двоглазов, Д.С. Вагшаль. – Свердловск : Уралгеолфонд, 1987. – 170 с.; с графич. прилож.

⁶ Гуляев, А.Н. Отчет о научно-исследовательской работе по теме: «Схематическое сейсмическое районирование территории Екатеринбурга» ; работа по договору №01/066 Ек от 20/08/01 с Уральским региональным центром экологической эпидемиологии / А.Н. Гуляев, В.С. Дружинин. – Екатеринбург, 2001. – 72 с.

Деформация геологической среды территории мегаполиса кроме тектонических сил обусловлена также ее плотностной неоднородностью – интрузивными массивами. По сравнению с плотностью вмещающих пород, гранитные и гранитоидные массивы являются менее плотными, т.е. они «всплывают» во вмещающей среде, формируя в ней деформацию растяжения. «Тяжелые» ультраосновные массивы габбровой формации «погружаются» во вмещающую их среду, способствуя в ней деформации сжатия. Таким образом, деформация геологической среды, которая обусловлена плотностной неоднородностью, имеет следующие характеристики (рисунок 4):

- первая и вторая главные оси деформации, которые лежат в горизонтальной плоскости, (e_1 , e_2) ориентированы субмеридионально и субширотно, т.е. параллельно и перпендикулярно простиранию основных структур палеозойского возраста; третья главная ось субвертикальная;
- первое и второе главные значения деформации (e_1 , e_2) являются растяжением и сжатием, третье главное значение является сжатием, т.е. в этом случае в геологической среде будут развиваться и активизироваться, прежде всего, разрывы сдвигового кинематического типа;
- активизация разрывов, обусловленных гравитационной силой, подтверждается геологическими данными: широким развитием глубоких карманов выветрелых пород по контактам даек гранит-порфиров в осевых зонах разломов, проявлением в рельефе поверхности земли новейших тектонических движений⁷;
- флексурно-разрывные зоны, формируясь в режиме растяжения, обеспечивают высокую проницаемость геологической среды, т.к. в почвенном воздухе и в подземных водах повышенная концентрация радона⁸.



1 – массивы интрузивных пород: I – Верх-Исетский; II – Шувакишский;
III – Уктусский; IV – Шарташский; V – Свердловский; VI – Широкореченский;
2 – растяжение; 3 – сжатие; 4 – контур территории г. Екатеринбурга

Рисунок 4. – Поле главных компонент деформации e_1 и e_2

В пределах мегаполиса геологическая среда представляет собой различные типы метаморфических пород. Изучая деформационные свойства этих пород, можно сказать, что исходная порода подвергается вторичным структурно-деформационным изменениям при метаморфических процессах, что приводит к снижению ее прочности⁹ [14]. Геологическая среда, представляющая собой крупный тектонический узел, в структурно-тектоническом отношении находится в стабильном напряженном состоянии и может быть благоприятна на проявления в ней динамических событий, которые будут не высоки по интенсивности, но часты по времени. В такой среде будет накапливаться упругая энергия. Но в связи с ее невысокой прочностью из-за большого количества тектонических нарушений различного ранга и различных кинематических типов будет происходить разрядка напряжений (динамические события) на невысоком уровне накопленной в ней упругой энергии, что связано с невысокой сейсмичностью, характером современных движений, стабильным напряженным состоянием и пространственной закономерностью.

Закономерности разрушения трубопроводов на территории мегаполиса. В Екатеринбурге ежегодно происходит множество переломов и разрывов водопроводных труб¹⁰. Значительная часть таких аварий вызвана

⁷ См. сноску 5.

⁸ Илларионов, В.Д. Карта районирования по степени потенциальной радоновой опасности территории Екатеринбурга масштаба 1:25000 : отчет о результатах работ за 1996 год по договору №9-96-Э с администрацией г. Екатеринбурга ГПП «Зеленогорскгеология», Центрально-Уральская партия № 75 / В.Д. Илларионов. – Екатеринбург, 1997. – 112 с.

⁹ Турчанинов, И.А. Некоторые представления о напряженном состоянии горных пород / И.А. Турчанинов // Прикладные задачи механики горных пород : материалы 5-й Всесоюз. конф. по механике горных пород. – М. : Наука, 1977. – С. 18–21.

¹⁰ См. сноску 6.

тектоническими причинами, а именно движением по разломам, разрывам и трещинам блоков геологической среды. Изучая места аварий, можно предположить, что они практически равномерно рассредоточены по той части территории г. Екатеринбурга, где вышеупомянутые разломы, разрывы и трещины установлены. Аварии наблюдаются в одном месте многократно, т.е. для них характерна повторяемость. В геологической среде динамический режим сохраняется и поддерживается на одном уровне в пространственном и временном отношениях, т.е. является стабильным из-за закономерности в аварийности. Большая плотность мест аварий свидетельствует о том, что геологическая среда разделена тектоникой на большое количество блоков, поперечные размеры которых невелики (рисунок 5).

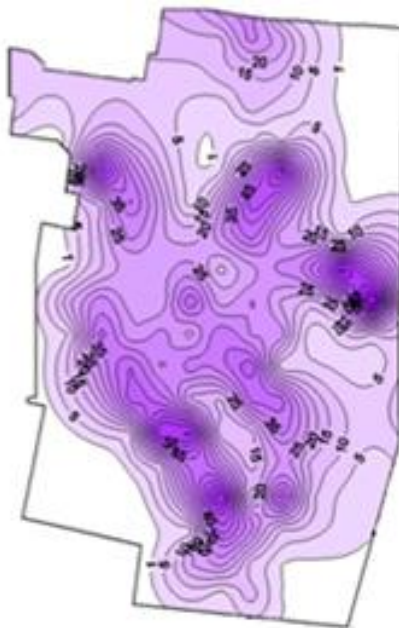


Рисунок 5. – План плотности аварий на линиях водопровода на территории мегаполиса за 1995–1999 гг.; изолинии оцифрованы в кол./км²

В кинематическом отношении блоки ограничены тектоническими нарушениями сбросовой и сбросо-взбросовой природы, т.е. они сформировались под действием касательных напряжений. За счет упругой энергии, аккумулированной в геологической среде, и происходит разрушение водопроводных труб. Исходя из кинематики разрывов труб под действием сдвиговых деформаций поверхности земли, их размеров, толщины стенок, материала и инженерно-геологических условий, в которых трубы залегают, была оценена потенциальная энергия, затрачиваемая на разрушение в год одной тысячи труб. Расчетами было установлено, что для разрушения тысячи стальных труб диаметром от 1,220 до 0,089 м с толщиной стенок от 0,009 до 0,005 м затрачивается от $4,56 \cdot 10^7$ до $7,63 \cdot 10^6$ Дж энергии. Много это или мало? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо сравнить количество энергии, затрачиваемой на разрушение тысячи труб, с количеством энергии, выделяемой при землетрясениях разной магнитуды. Магнитуда землетрясений в районе мегаполиса оценена в 1–2. При землетрясениях такой магнитуды выделяемая энергия оценивается в $2 \cdot 10^6$ – $6,3 \cdot 10^7$ Дж, т.е. энергия, идущая на разрушение водопроводов, равна с точностью до порядка энергии, которая выделяется при землетрясении.

Закключение. Из анализа факторов, определяющих естественное динамическое состояние геологической среды Екатеринбургского мегаполиса на региональном и локальном уровнях (геологический, структурно-тектонический, сейсмичность, современные движения, естественное напряженное состояние, плотностная неоднородность и др.), следует, что основную роль в динамическом состоянии среды мегаполиса играют ее плотностные неоднородности (интрузивные массивы). Плотностные неоднородности (гравитационная сила), обладая различной относительной плотностью (избыточная плотность, дефект плотности), являются источниками напряжения, деформирующими геологическую среду. Сопоставление главных значений и главных направлений деформации, обусловленных плотностными неоднородностями, с простираемостью и кинематикой разрывных нарушений, установленных геологическими методами, свидетельствует, что их активизация на современном этапе тектоногенеза принадлежит гравитационной силе. Тектоническая сила имеет второстепенное значение.

Гравитационная сила (плотностные неоднородности), деформируя геологическую среду, создает в ней режим растяжения на большей части территории мегаполиса, способствуя увеличению ее проницаемости, особенно в зонах разрывных нарушений высоких рангов.

В структурно-тектоническом отношении территория мегаполиса расчленена разрывными нарушениями на большое число блоков, поперечные размеры которых измеряются первыми десятками метров. Режим растяжения создает благоприятные условия для взаимного перемещения блоков, главным образом по вертикали, о чем свидетельствуют многочисленные разрывы водопроводов. В таких условиях в геологической среде мегаполиса

невозможно накопление упругой энергии в количествах, необходимых для того, чтобы могло произойти интенсивное динамическое событие, и сейсмологический мониторинг подтверждает этот вывод. Геологическая среда мегаполиса обладает невысокими прочностными свойствами и находится в близком к разгрузке режиме, поскольку большая часть упругой энергии среды диссипатирует, переходя в тепло, лишь незначительно нагревая ее¹¹.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геология СССР. Т. XII. Ч. 1. Кн. 2 / под ред. П.И. Аладинского [и др.]. – М. : Недра, 1968. – 304 с.
2. Сейсмические события Уральского региона за 1914–2002 гг. / В.С. Ломакин [и др.]. – М. ; Обнинск : ЦСГНЭО, 2002. – 86 с.
3. Гуляев, А.Н. Сейсмичность и сейсмическое районирование Урала / А.Н. Гуляев // Изв. вузов. Гор. журн. – 2016. – № 6. – С. 116–124.
4. Ананьин, И.В. Европейская часть СССР, Урал, Западная Сибирь: Новейший каталог сильных землетрясений территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / И.В. Ананьин. – М. : Наука, 1977. – С. 465–470.
5. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. – М. : Наука, 1977. – 534 с.
6. Блюмин, М.А. Схема вертикальных деформаций земной коры Урала. Масштаб 1: 2 500 000 / М.А. Блюмин, Р.В. Улитин. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1983. – 2 л.
7. Филатов, В.В. О подобии и иерархии тектонических структур / В.В. Филатов, Л.А. Болотнова // Изв. вузов. Гор. журн. – 2019. – № 1. – С. 52–59.
8. Филатов, В.В. Гравиразведка. Метод тектонофизического анализа гравитационного поля / В.В. Филатов, Л.А. Болотнова. – Екатеринбург : УГГУ, 2015. – 284 с.
9. Панжин, А.А. Наблюдения за движением земной поверхности на горных предприятиях с использованием GPS / А.А. Панжин // Изв. Урал. гос. гор.-геол. акад. Сер. Гор. дело. – 2000. – Вып. 11. – С. 196–203.
10. Бачманов, Д.М. Неотектоника Урала (проблемы и решения) / Д.М. Бачманов, Н.Н. Говоров // Геотектоника. – 2001. – № 5. – С. 61–75.
11. Болотнова, Л.А. Гравиразведка. Тектонофизический анализ гравитационного поля Екатеринбургского мегаполиса / Л.А. Болотнова, В.В. Филатов. – Екатеринбург : УГГУ, 2010. – 176 с.
12. Влох, Н.П. Управление горным давлением на железных рудниках / Н.П. Влох, А.Д. Сашурин. – М. : Недра, 1974. – 184 с.
13. Зубков, А.В. Закон формирования природного напряженного состояния земной коры / А.В. Зубков // Литосфера. – 2016. – № 5. – С. 146–151.
14. Звягинцев, Л.И. Деформация горных пород и эндогенное рудообразование / Л.И. Звягинцев. – М. : Наука, 1978. – 174 с.

REFERENCES

1. Aladinskii, P.I. (Eds.), Zoloev, K.K. (Eds.), Pervago, V.A. (Eds.) & Sidorenko, A.V. (Eds.) (1968). *Geologiya SSSR*, T. XII, Ch. 1, Kn. 2. Moscow: Nedra. (In Russ.).
2. Lomakin, V.S., Godzikovskaya, A.A., Pribylova, N.E., Silina, I.K. & Mitenkova, N.V. (2002). *Seismicheskie sobytiya Ural'skogo regiona za 1914–2002 gg.* Moscow; Obninsk: TSSGNEO. (In Russ.).
3. Gulyaev, A.N. (2016). Seismichnost' i seismicheskoe raionirovanie Urala [Seismicity and seismic zoning of the Urals]. *Izv. vuzov. Gor. zhurn. [News of Universities. Mining magazine]*, (6), 116–124. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Anan'in, I.V. (1977). *Evropeiskaya chast' SSSR, Ural, Zapadnaya Sibir': Noveishii katalog sil'nykh zemletryasenii territorii SSSR s drevneishikh vremen do 1975 g.* Moscow: Nauka. (In Russ.).
5. Kondorskaya, N.V. (Eds.) & Shebalin, N.V. (Eds.) (1977). *Novyi katalog sil'nykh zemletryasenii na territorii SSSR s drevneishikh vremen do 1975 g.* Moscow: Nauka. (In Russ.).
6. Blyumin, M.A. & Ulitin, R.V. (1983). *Skhema vertikal'nykh deformatsii zemnoi kory Urala. Masshtab 1: 2 500 000.* Sverdlovsk: UNTs AN SSSR. (In Russ.).
7. Filatov, V.V. & Bolotnova, L.A. (2019). O podobii i ierarkhii tektonicheskikh struktur [About similarity and hierarchy of tectonic structures]. *Izv. vuzov. Gor. zhurnal [News of Universities. Mining magazine]*, (1), 52–59. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Filatov, V.V. & Bolotnova, L.A. (2019). *Gravirazvedka. Metod tektonofizicheskogo analiza gravitatsionnogo polya.* Yekaterinburg: UGGU. (In Russ.).
9. Panzhin, A.A. (2000). Nablyudeniya za sdvizheniem zemnoi poverkhnosti na gornyykh predpriyatiyakh s ispol'zovaniem GPS [Observations of the Earth's Surface Movement at Mining Enterprises Using GPS]. *Izv. Ural. gos. gor.-geol. akad. Ser. Gor. delo [Proceedings of the Ural State Mining and Geological Academy. Series Mining]*, (11), 196–203. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Bachmanov, D.M. & Govorov, N.N. (2001). Neotektonika Urala (problemy i resheniya) [Neotectonics of the Urals (problems and solutions)]. *Geotektonika [Geotectonics]*, (5), 61–75. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Bolotnova, L.A. & Filatov, V.V. *Gravirazvedka. Tektonofizicheskii analiz gravitatsionnogo polya Ekaterinburgskogo megapolisa.* Yekaterinburg: UGGU. (In Russ.).
12. Vlokh, N.P. & Sashurin, A.D. (1974). *Upravlenie gornym davleniem na zheleznykh rudnikakh.* Moscow: Nedra. (In Russ.).
13. Zubkov, A.V. (2016). Zakon formirovaniya prirodnogo napryazhennogo sostoyaniya zemnoi kory [The law of formation of the natural stress state of the earth's crust]. *Litosfera [Lithosphere]*, (5), 146–151. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Zvyagintsev, L.I. (1978). *Deformatsiya gornykh porod i endogennoe rudoobrazovanie.* Moscow: Nauka. (In Russ.).

Поступила 09.11.2022

¹¹ Шапов, В.А. Геотермические исследования Урала : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук : 25.00.10. – Екатеринбург, 2006. – 216 л.

**METHODS AND RESULTS OF STUDYING THE DYNAMIC STATE
OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT OF THE URBANIZED AREA
(USING THE EXAMPLE OF THE YEKATERINBURG METROPOLIS)**

V. PHILATOV

(Vladimir State University)

K. VANDYSHEVA

(Ural State Mining University, Yekaterinburg)

The types and qualitative and quantitative characteristics of man-made phenomena in a significantly urbanized territory are largely determined not only by the man-made load, but mainly also by the fact that the earth's crust within this territory is in geological, structural-tectonic, geomorphological, engineering-geological, dynamic and other natural relations. About 1.5 million people live on the territory of one of the largest Yekaterinburg metropolis in Russia with an area of more than 1000 km² and, having a complex surface relief, there are a huge number of gigantic industrial enterprises for various production purposes, a metro, four pond reservoirs. Consequently, the level of technogenic load on the geological environment is very high here. Therefore, relevant in scientific, practical and social-ecological relations is the task of studying its natural dynamic state in order to subsequently predict negative dynamic events within its limits in the form of man-made earthquakes, mountain impacts, etc. This is the problem of this article. In a substantive and methodological respect, the study of the natural dynamic state of the territory of the metropolis consists in the consideration and analysis of such important factors as: the geological and structural-tectonic structure of the geological environment, its seismicity, the nature of modern movements of the earth's surface and the natural stressed-deformed state due to tectonic and gravitational (density heterogeneity of the geological environment) forces.

Keywords: *urbanization, technogenesis, geological environment, seismicity, modern earth surface movements, natural stress field, territory of Yekaterinburg metropolis.*

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.4:332.54

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-102-106

МОНИТОРИНГ ТРАНСФОРМАЦИИ ЗЕМЕЛЬ ПРИГРАНИЧНЫХ ТЕРРИТОРИЙ
ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

М.В. МАКАРОВА,

канд. техн. наук К.И. МАРКОВИЧ,

канд. техн. наук И.П. ШЕВЕЛЕВ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье приведены результаты анализа трансформации территорий, являющихся приграничными к границам административно-территориальных единиц. Сделаны выводы о необходимости своевременного учета происходящих изменений элементов природно-экологического каркаса, а также видов земель, активно трансформирующихся под воздействием антропогенных факторов. Предложена автоматизация распознавания контуров земель приграничных территорий средствами геоинформационных систем. Предложена количественная оценка изменений объектов природной среды приграничных территорий, на основе которой сделаны выводы о необходимости уменьшения временного интервала корректировки пространственного положения границ административно-территориальных единиц.

Ключевые слова: административно-территориальные единицы, установление границ, нормализация границ, мониторинг, землеустройство, земельно-информационные системы, данные дистанционного зондирования Земли.

Введение. Как показала практика выполнения работ по нормализации границ административно-территориальных и территориальных границ (далее – АТЕ и ТЕ), проводимых с 2016 по 2021 гг. специалистами РУП «Проектный институт Белгипрозем», большая доля участков границ районов совмещается с объектами гидрографии и контурами земель (т.е. объектами природно-экологического каркаса).

Нормативный срок проведения повторных работ по нормализации и установлению границ АТЕ и ТЕ – 50 лет¹. Однако расхождения фактических и зарегистрированных границ административно-территориальных единиц чаще всего связаны с несвоевременным учетом (внесением изменений и дополнений) результатов происходящих природных и антропогенных процессов в Земельно-информационные системы (далее – ЗИС) районов [1; 2].

Основная часть. Мониторинг состояния земельных ресурсов по данным дистанционного зондирования Земли (далее – ДЗЗ) проводится специалистами РУП «Проектный институт Белгипрозем», прежде всего, с целью государственного контроля за использованием и охраной земель [1].

Мониторинг по данным ДЗЗ – это процесс внесения в ЗИС района изменений, произошедших в результате антропогенного воздействия (характера использования, выхода из строя мелиоративных систем, неиспользования земельных участков и нарушения земель) либо природных факторов (естественного зарастания, заболачивания, меандрирования рек) по актуальным данным дистанционного зондирования Земли². При обнаружении подобных изменений происходит согласование с землеустроительными службами местных органов власти, в границах компетенций которых расположена рассматриваемая территория.

Тем самым, специалистами, отвечающими за эксплуатацию ЗИС в данном районе, производится так называемое **сличение** – процесс сопоставления актуальных данных дистанционного зондирования Земли с информацией базы данных земельно-информационной системы с целью выявления признаков изменений видов земель, выполняемый при ведении (эксплуатации) земельно-информационной системы в рабочем порядке³.

Преимущество предлагаемой авторами методики по сравнению с визуальным дешифрированием в процессе сличения заключается в использовании алгоритма выделения границ объектов природно-экологического каркаса на основе сравнения разновременных снимков в полуавтоматическом и автоматическом режиме с использованием обучаемой классификации.

Автоматизация распознавания контуров земель приграничных территорий. При анализе данных дистанционного зондирования Земли используются специализированные программные комплексы, ориентированные на профессиональную обработку многоканальных снимков, и геоинформационные системы, обладающие инструментарием для обработки и интерпретации результатов.

¹ Методические указания по нормализации и установлению границ административно-территориальных единиц Республики Беларусь : утв. приказом респ. унитар. предп. «Проект. ин-т Белгипрозем», 11 апр. 2016 г., № 20. – Минск : УП «Проектный институт Белгипрозем», 2016. – 31 с.

² Земельно-информационная система Республики Беларусь. Порядок создания и ведения (эксплуатации, обновления) : ТКП 610-2017 (33520). – Введ. 01.07.22. – Минск : Белгипрозем, 2022. – 92 с.

³ См. сноску 2.

Для дешифрирования и объединения полученных однородных пикселей в требуемые группы используются стандартные функции ArcGIS, которые представляют собой классификацию с обучением и без обучения.

Классификация с обучением позволяет в ручном режиме определить количество классов и задать эталонные по значениям пиксели. Таким образом создать файлы сигнатур, участвующие в процессе обработки. В последующем используется модуль Spatial Analyst. Происходит так называемая фильтрация полученных результатов.

Блок-схема последовательности операций с растрами в ArcGIS представлена на рисунке 1.

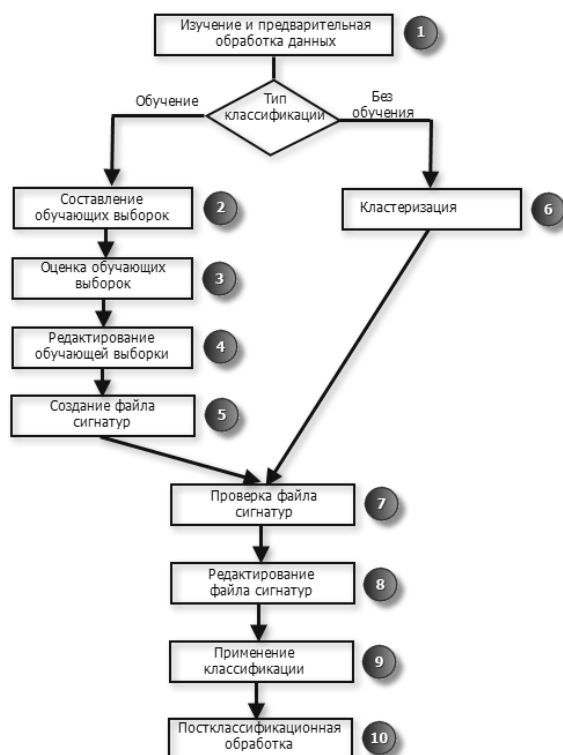


Рисунок 1. – Блок-схема последовательности операций по классификации изображений в среде ArcGIS⁴

В качестве исходных данных были использованы свободно распространяемые многоканальные снимки Landsat⁵ (приграничные территории Бобруйского района по состоянию на 1984, 2000, 2022 гг.). Синтезирование снимков необходимо для более четкого визуального или автоматического выделения границ объектов. В рамках исследования подобраны наиболее информативные комбинации каналов изображения (ближний ИК: коротковолновый ИК: красный), что представлено на рисунке 2.

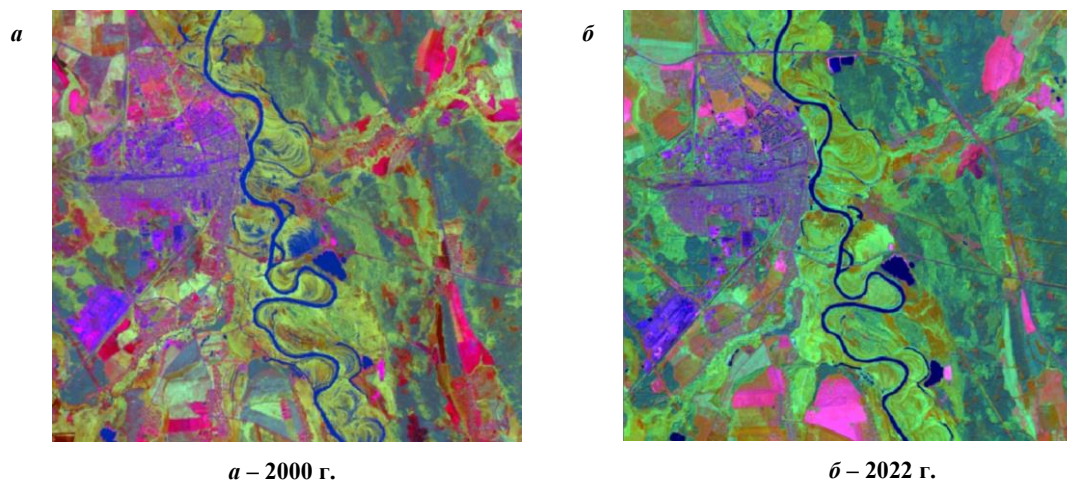


Рисунок 2. – Синтез многозонального космического снимка исследуемой территории в ложной цветопередаче в соотношении каналов 5:4:3

⁴URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/image-classification/image-classification-using-spatial-analyst.htm>.

⁵ URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Следующим этапом происходит управляемая классификация. Были заданы классы землепользований для получения обучающих выборок. Результаты классификации после проверки и редактирования файла сигнатур представлены на рисунке 3.

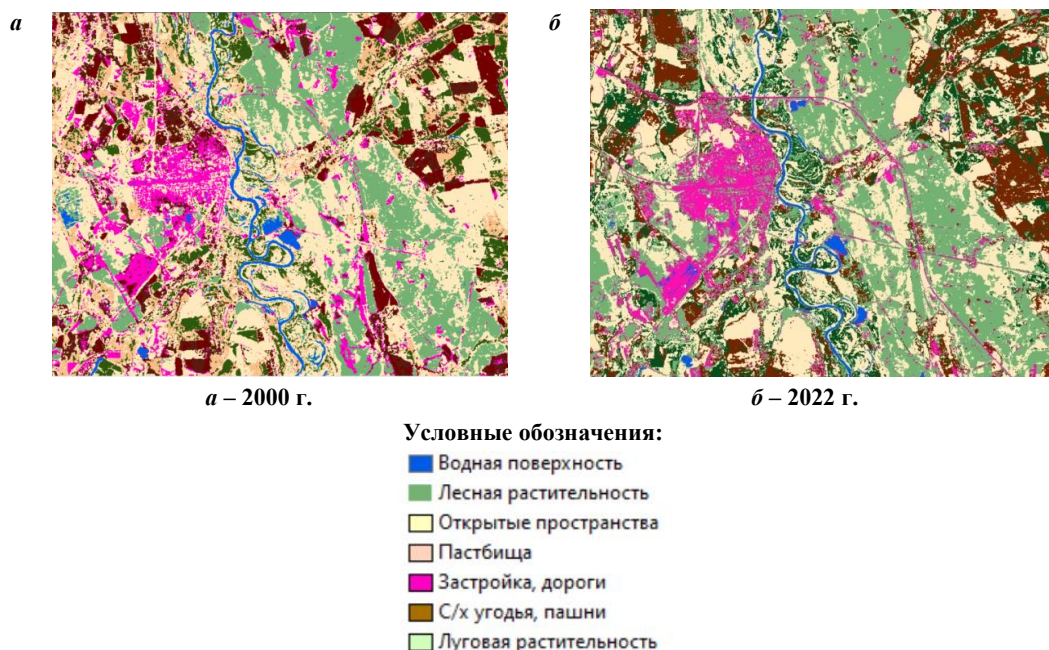


Рисунок 3. – Выходные классифицированные растры приграничных территорий

В ПО ArcGIS авторами был использован инструмент *Фильтр большинства (Majority Filter)*, который замещает значения ячеек раstra, основываясь на значениях большинства соприкасающихся смежных ячеек [3].

Конечная задача сводится к отнесению полученных данных в определенное количество групп. С помощью конвертации раstra в полигоны возможно осуществить подсчет площадей контуров земель по заданным категориям и оценить динамику изменений во времени.

Количественная оценка изменений объектов. Для анализа и оценки происходящих антропогенных и природных процессов вблизи границ АТЕ возможно учитывать ряд показателей:

1. Изменение площади приграничного площадного объекта, $S_{\text{тенд}}$, га:

$$S_{\text{тенд}} = \frac{S_{\text{изм.}}}{S_{\text{общ.}}} \times 100\%, \quad (1)$$

где $S_{\text{изм.}}$ – площадь изменения конкретного приграничного объекта;
 $S_{\text{общ.}}$ – общая площадь объекта на начальный период⁶.

2. Показатель тенденции изменения периметра приграничного площадного объекта, $P_{\text{тенд}}$, км:

$$P_{\text{тенд}} = \frac{P_{\text{изм.}}}{P_{\text{общ.}}} \times 100\%, \quad (2)$$

где $P_{\text{изм.}}$ – периметр изменения конкретного приграничного объекта;
 $P_{\text{общ.}}$ – общий периметр объекта на начальный период.

3. Показатель изменения длины приграничного линейного объекта, $L_{\text{тенд}}$, км:

$$L_{\text{тенд}} = \frac{L_{\text{изм.}}}{L_{\text{общ.}}} \times 100\%, \quad (3)$$

где $L_{\text{изм.}}$ – длина изменения конкретного приграничного объекта;
 $L_{\text{общ.}}$ – общая длина объекта на начальный период.

4. Скорость изменения объектов во времени, $V_{\text{тенд}}$, км(га)/год:

$$V_{\text{тенд}} = \frac{L_{T2-T1}}{T}, \quad (4)$$

где L_{T2-T1} – площадь/периметр/длина контура объекта за временной интервал, км;
 T – величина временного интервала (5, 10, 15, 20 и т.д. лет).

В таблице 1 приведены динамические показатели изменения *площади* ($S_{\text{тенд}}$, %) и *скорости изменения площади* ($V_{\text{тенд}}$, га/год) приграничных объектов Бобруйского района для периода наблюдений в 38 лет (1984–2022 гг.) с интервалами в 16 лет и 22 года.

⁶ Беленко, В.В. Концепция и технология мониторинга земель застраиваемых территорий по материалам космической съемки : дис. ... д-ра техн. наук : 25 00 26 / В.В. Беленко. – М., 2019. – 209 л.

Таблица 1. – Динамические показатели изменения приграничных природных объектов Бобруйского района

Наименование объекта	1984–2000 гг.		2000–2022 гг.		1984–2022 гг.	
	$S_{\text{тенд}}$, %	$V_{\text{тенд}}$, га/год	$S_{\text{тенд}}$, %	$V_{\text{тенд}}$, га/год	$S_{\text{тенд}}$, %	$\Delta V_{\text{тенд}}$, га/год
Крупные массивы лесной растительности/контура	7,7	0,9	4,3	0,43	4,9	0,7
Открытые пространства, застройка	2,2	23,17	0,7	17,4	2,8	20,3
Сельскохозяйственные угодья	11,0	57,3	8,2	60,01	19,2	58,7
Русло водотоков	2,1	0,8	1,6	0,015	2,7	0,4
Контура водоемов	0,01	-	-	-	0,01	-

Интерпретация результатов. С 1984 по 2000 годы наибольшему изменению подверглись контура сельскохозяйственных угодий и лесной растительности. Территория изменилась благодаря развитию частного сектора (индивидуальной жилой застройке). Наименьшему изменению подверглись контура водоемов.

За период с 2000 по 2022 г. динамика изменений схожа с предыдущим периодом. При общем уменьшении $S_{\text{тенд}}$ площадь изменения га/год немного увеличилась. Изменение русел водотоков для данного участка также подтверждается количественными характеристиками.

Наибольшие изменения в динамике с 1984 по 2022 годы показали лесные и сельскохозяйственные земли. Это может быть связано с трансформацией угодий, интенсификацией сельского хозяйства и переводом земель из одной категории в другую (изъятие сельскохозяйственных земель и предоставление их для несельскохозяйственных целей).

На рисунке 4 видно, что имеются участки нормализованной границы, проходящие по лесным землям и сельскохозяйственным контурам. Данные участки подвержены трансформации и требуют своевременного учета.



Рисунок 4. – Наложение современной границы Бобруйского района в Геопортале ЗИС (базовая карта – материалы аэрофотосъемки)⁷

Полученные данные в целом соотносятся в тенденции с результатами годовой отчетности (форма 22-ЗЕМ) по районам, что представлено на диаграмме динамики изменений видов и земель Бобруйского района (рисунок 5).

Экстраполируя полученные данные на другие АТЕ (районы), необходимо отметить, что тенденция уменьшения площадей сельскохозяйственных земель по стране в целом весьма устойчива. Площадь сельскохозяйственных земель в период с 1958 по 2010 гг. ежегодно уменьшалась в среднем на 22,8 тыс. га, по сравнению с начальным уровнем. Среднегодовое сокращение сельскохозяйственных земель в 1965–2010 гг. составило 25,4 тыс. га. Уменьшение проходило в основном за счет Витебской, Гомельской и Могилевской областей⁸.

Проведенные экспериментальные исследования на тестовой приграничной территории (Бобруйского района) по апробированию предложенных методик на базе многозональных космических снимков спутника Landsat показали, что изменения контуров видов земель, к которым привязываются границы, происходят быстрее, чем за 50 лет.

Автором сделан вывод о необходимости уточнения границ, проходящих по контурам сельскохозяйственных земель, массивов леса и руслам рек, каждые 20–25 лет. Также, исходя из тенденции трансформации сельскохозяйственных земель, можно сделать вывод о нецелесообразности привязки нормализуемой границы к контурам сельскохозяйственных и лесных земель.

Достоверность получаемых результатов может быть увеличена при:

- 1) проведении оценки точности классификации растровых изображений;
- 2) повышении пространственного разрешения исходных данных дистанционного зондирования (использовании ортофотопланов для расчета изменений в площадях);
- 3) повышении спектрального разрешения данных;
- 4) применении различных способов фильтрации;
- 5) применении разностных изображений (позволяющих делать вычитание результатов классификации разновременных растров).

⁷ URL: <https://gismap.by/next/?opendata>.

⁸Национальный доклад о состоянии, использовании и охране земельных ресурсов Республики Беларусь / Гос. комитет по имуществу Республики Беларусь ; под ред. Г.И. Кузнецова. – Минск : РУП «БелНИЦзем», 2011. – 184 с.

Это, в свою очередь, может позволить проводить мониторинг земель приграничных территорий с достаточно высокой детальностью изменений и фиксировать изменения с целью последующей нормализации границ АТЕ и ТЕ в рабочем порядке.

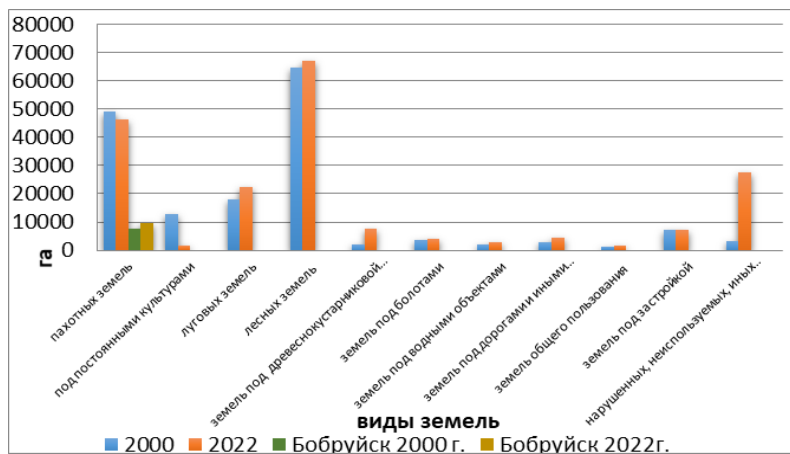


Рисунок 5. – Динамика трансформации видов земель Бобруйского района (и г. Бобруйска) в интервале 2000–2022 гг. (составлено по статистическим данным⁹)

Закключение. Поскольку работы по нормализации и установлению границ будут актуальны в будущем, авторами предложено минимизировать затраты времени и средств путем добавления в практику РУП «Белгипрозем» периодического отслеживания изменений приграничных к АТЕ и ТЕ территорий путем внесения изменений по границам в отдельный слой в процессе регулярного мониторинга состояния земельных ресурсов по данным ДЗЗ.

В связи с этим авторами предложена концепция функционирования мониторинга состояния земельных ресурсов с целью выявления изменений фактического состояния приграничных земельных участков с помощью ЗИС района и ДЗЗ.

Предлагаемый алгоритм мониторинга земель приграничных территорий, в отличие от ранее реализованных подходов к нормализации и установлению границ АТЕ и ТЕ, позволяет, используя автоматизированную обработку в специализированном программном обеспечении, выявлять трансформации земель, а также элементов территориального планирования, оценивать их количественные характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макарова, М. Геоинформационное обеспечение нормализации и установления границ районов Республики Беларусь / М. Макарова, А. Помелов // Земля Беларуси. – 2016. – № 3. – С. 35–39.
2. Грищенко, В. Об установлении границ административных районов / В. Грищенко // Земля Беларуси. – 2017. – № 4. – С. 2–4.
3. Пономарчук, А.И. Дистанционное зондирование в картографии: учеб. пособие / А.И. Пономарчук, Е.С. Черепанова, А.Н. Шихов. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2013. – 100 с.

REFERENCES

1. Makarova, M. & Pomelov, A. (2016). Geoinformational support of normalization and establishment of boundaries of regions of the Republic of Belarus. *Zemlya Belarusi*, (3), 35–39. (In Russ.).
2. Grishchenko, V. (2017). On the establishment of boundaries of administrative districts. *Zemlya Belarusi*, (4), 2–4. (In Russ.).
3. Ponomarchuk, A.I., Cherepanova, E.S. & Shikhov, A.N. (2013). *Distantionnoe zondirovanie v kartografii*. Perm: Perm. gos. nats. issled. un-t. (In Russ.).

Поступила 15.11.2022

MONITORING OF LAND TRANSFORMATION IN BORDER TERRITORIES USING MATERIALS OF REMOTE SENSING DATA

M. MAKARAVA, K. MARKOVICH, I. SHEVELEV
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article presents the results of the analysis of changes in territories that are bordering to the boundaries of administrative-territorial units. Conclusions are drawn about the need to timely take into account the ongoing changes in the elements of the natural and ecological framework, as well as types of land that are actively transforming under the influence of anthropogenic factors. The automation of land contour recognition in border areas by means of geographic information systems is proposed. A quantitative assessment of changes in the natural environment objects of border areas is proposed, on the basis of which conclusions are drawn about the need to reduce the interval for adjusting the spatial position of the boundaries of administrative-territorial units.

Keywords: administrative-territorial units, establishment of boundaries, normalization of boundaries, monitoring, land management, land information systems, remote sensing data.

⁹ URL: http://gki.gov.by/ru/activity_branches-land-reestr/.

УДК 551.24:519.233.5(476)

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-107-113

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ВОЗМОЖНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

канд. техн. наук К.И. МАРКОВИЧ,
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ,
канд. техн. наук, доц. А.М. ДЕГТЯРЕВ,
М.В. МАКАРОВА

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье рассмотрена возможность прогнозирования скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) с использованием комплексной методики геологической интерпретации геофизических полей Архангельского – Федынского – Фотиади. Выполнен поиск связей скоростей СВДЗК с аномальным гравитационным и магнитным полями, рельефом дневной поверхности, мощностью земной коры для одной геологической структуры территории Республики Беларусь в виде Оршанской впадины путем применения интегрального соотношения Каратаева – Ватлина – Захаровой. На основании результатов прогнозирования построена модельная карта скоростей СВДЗК, имеющая достаточную точность и достоверность для практического использования.

Ключевые слова: скорости современных вертикальных движений земной коры, аномалии ускорения силы тяжести в редукции Буге, рельеф дневной поверхности, мощность земной коры, магнитные аномалии, корреляционные уравнения связи.

Введение. В настоящее время основной схемой совместного анализа геологических и геофизических данных является схема А.Д. Архангельского – В.В. Федынского – Э.Э. Фотиади. Фактически данные ученые описали порядок и организацию процесса прогноза геологических элементов земной коры по гравитационным и магнитным аномалиям. В своих работах они убедительно доказали, что характер связи аномалий с различными геологическими элементами на подобных по структурно-геологическому развитию областях будет схож, что дает основания для прогнозирования геологических элементов на неизученных в тектоническом отношении областях по известному характеру связи в исследуемом районе [1–4].

Согласно качественной схеме геологической интерпретации Архангельского – Федынского – Фотиади, процедура прогнозирования может быть выполнена для геологических элементов двух видов: 1) количественно не измеряемые элементы; 2) элементы, определенные количественно измеряемыми величинами. Если во втором случае связь описывается различными регрессионными уравнениями, то в первом случае для связи элементы представлены в некотором формализованном виде.

Несмотря на необходимость математического описания представленной качественной схемы интерпретации, методам построения ее операторов авторами не было уделено должного внимания, и они не рассматривались с позиций их количественного описания.

Проблема количественного описания качественной схемы геологической интерпретации была решена Г.И. Каратаевым, Б.П. Ватлиными, Т.Л. Захаровой. Совместный анализ геологических карт и карт гравитационных и магнитных аномалий показал, что решение проблемы количественного описания представленной качественной схемы лежит в знании следующих закономерностей [1]:

- форма статистической связи аномальных полей для однотипных по геологическому строению областей является одинаковой. Данная закономерность требует деления исследуемой области на участки, в пределах которых связь геологических величин и геофизических полей условно можно было бы считать одинаковой (А.Д. Архангельский, В.А. Цареградский, В.В. Федынский, Э.Э. Фотиади);

- состав горных пород, их мощность и форма залегания корреляционно связаны с гравитационными и магнитными аномалиями (Б.К. Балавадзе, Г.А. Гамбрусев, Э.Э. Фотиади).

Принимая во внимание представленные выше черты закономерностей, Г.И. Каратаевым, Б.П. Ватлиным, Т.Л. Захаровой была разработана методика и математический аппарат геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. В рамках данной статьи авторами с использованием данной методики и математического аппарата Г.И. Каратаева, Б.П. Ватлина, Т.Л. Захаровой выполнен прогноз возможных значений скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) территории Республики Беларусь.

Основная часть. Методика и математический аппарат геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий, предложенные Г.И. Каратаевым, Б.П. Ватлиным, Т.Л. Захаровой, подробно описаны в [1; 5; 6] и состоят в разделении исследуемой области R на эталонную R^2 и прогнозную R^K с заданием множества геофизических и геологических элементов g и поиском корреляционных уравнений связи между интересующими параметрами. Правила деления территории разработаны Г.И. Каратаевым и детально представлены в [6].

Ранее в работе [7] автором был выполнен прогноз возможных значений скоростей СВДЗК V территории Беларуси с использованием методики Каратаева – Ватлина – Захаровой. Автором в качестве исходного набора

данных для прогнозирования скоростей СВДЗК были использованы: аномалии ускорения силы тяжести в редукции Буге ($\Delta g_{\text{Буге}}$), рельеф дневной поверхности (h), мощность земной коры ($H_{\text{МОХО}}$), магнитные аномалии (ΔT). Вид уравнения, связывающего скорости СВДЗК с перечисленными параметрами, имел следующий вид:

$$V = f(\Delta g_{\text{Буге}}, h, H_{\text{МОХО}}, \Delta T, G), \quad (1)$$

где G – информация о геологическом строении земной коры, полученная с использованием карты тектонического районирования¹ (рисунок 1).

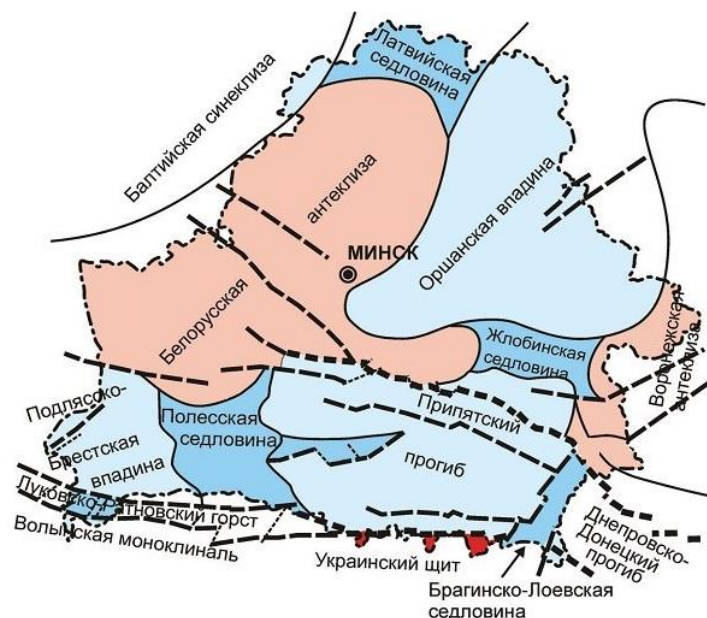


Рисунок 1. – Карта тектонического районирования территории Беларуси (по Р.Г. Гарецкому, Р.Е. Айзбергу)

Не найдя какой-либо значимой связи между скоростями СВДЗК и перечисленными выше параметрами, в [7] выполнено разделение территории Беларуси на классы с использованием карты тектонического районирования. На исследуемой территории была выделена следующая S_2 -классификация: Подляско-Брестская впадина, Оршанская впадина, Белорусская антеклиза, Припятский прогиб, Полесская седловина. S_3 -классификацию составили: Центрально-Белорусский массив, Вилейский погребенный выступ. Анализ графиков корреляции для перечисленных тектонических структур показал, что связь скоростей СВДЗК с перечисленными параметрами наилучшим образом определяется выражением (2):

$$V = a + b_1 X + c_1 X^2, \quad (2)$$

где X – один из перечисленных параметров;

a, b, c – коэффициенты связи.

Пример корреляционной связи скоростей СВДЗК V с аномалиями ускорения силы тяжести в редукции Буге $\Delta g_{\text{Буге}}$ представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Корреляционные связи V (мм) с $\Delta g_{\text{Буге}}$ (мГал) для тектонических структур Беларуси

Наименование структур	Уравнение регрессии	R^2	ε , мм
Оршанская впадина	$V = -7,587 - 0,6047 \Delta g_{\text{Буге}} - 0,01276 \Delta g_{\text{Буге}}^2$	0,71	0,36
Припятский прогиб	$V = -0,887 + 0,018 \Delta g_{\text{Буге}} + 0,000037 \Delta g_{\text{Буге}}^2$	0,56	0,30
Полесская седловина	$V = -3,824 - 0,0395 \Delta g_{\text{Буге}} + 0,0037 \Delta g_{\text{Буге}}^2$	0,92	0,37
Подляско-Брестская впадина	$V = 1,297 + 0,1581 \Delta g_{\text{Буге}} + 0,00178 \Delta g_{\text{Буге}}^2$	0,56	0,39
Вилейский погребенный выступ	$V = -0,2598 + 0,0548 \Delta g_{\text{Буге}} - 0,0094 \Delta g_{\text{Буге}}^2$	0,78	0,42
Центрально-Белорусский массив	$V = -1,2341 + 0,1286 \Delta g_{\text{Буге}} + 0,0043 \Delta g_{\text{Буге}}^2$	0,48	0,46

Примечание. R^2 – коэффициент детерминации, ε – оценка точности регрессионной модели.

Несмотря на простую форму, представленные в таблице 1 корреляционные уравнения имеют достаточно тесную связь. Данный факт подтверждает работоспособность методики и математического аппарата Каратаева – Ватлина – Захаровой и свидетельствует о том, что разделение территории Беларуси на классы в [7] выполнено верно.

¹Национальный атлас Беларуси. – Минск : Белкартография, 2002. – 292 с.

В данной статье рассмотрена возможность прогнозирования значения скоростей СВДЗК с использованием более сложного интегрального соотношения (3), полученного в работе Г.И. Каратаева, Б.П. Ватлина, Т.Л. Захаровой [1].

$$V(r) = \int_{R_0} g(r^1) \cdot P(r-r^1) dr^1, \quad (3)$$

где R_0 – область интегрирования;
 g – геофизический, геодезический параметр;
 $P(r-r^1)$ – весовая функция.

Его дискретный аналог выглядит следующим образом:

$$V(r_i) = \sum_{\mu=0}^m \alpha_{\mu} \cdot g(r_i + \Delta r_{\mu}), \quad (4)$$

где $g(r_i + \Delta r_{\mu})$ – среднее значение геофизического, геодезического параметра на окружности радиуса Δr_{μ} с центром в точке r_i .

Чтобы использовать выражение (4) для прогнозирования возможных значений скоростей СВДЗК по какому-либо параметру, необходимо с помощью метода наименьших квадратов найти неизвестные коэффициенты α_{μ} .

В качестве исследуемой территории для поиска возможных значений скоростей СВДЗК выбрана одна из тектонических структур – Оршанская впадина. Как эталонные значения скоростей СВДЗК для поиска корреляционных связей использовались скорости реперов «Карты современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР»² (рисунок 2).



Рисунок 2. – Фрагмент карты современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР масштаба 1:5000000, 1989 г.

С использованием выражения (4) выполнен прогноз скоростей СВДЗК по тому же набору геофизических и геодезических параметров, что и в работе [7]. Аномальное поле на территорию Оршанской впадины представлено на рисунке 3.

²Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР. Масштаб 1:5 000 000. – М. : ГУГК, 1989.

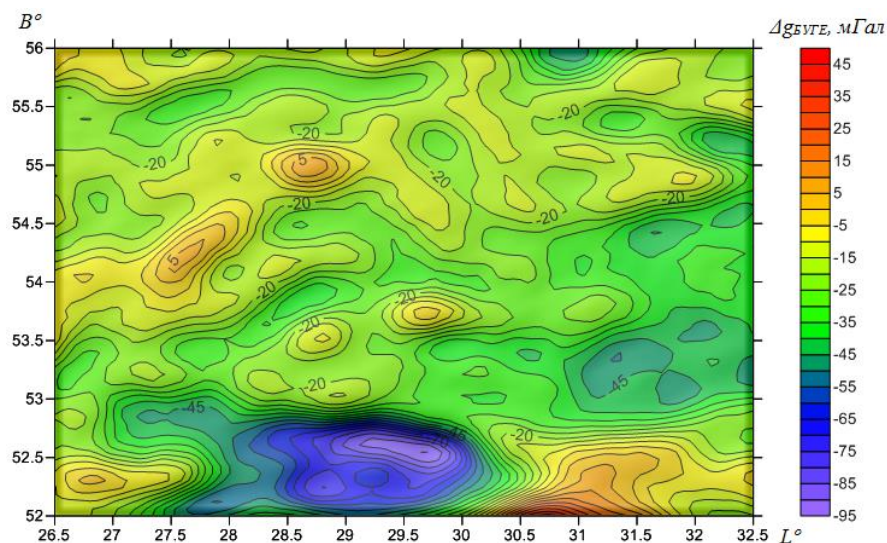


Рисунок 3. – Аномалии ускорения силы тяжести в редукции Буге для территории Оршанской впадины³

В наших обозначениях выражение (4) с учетом используемых для поиска связей геофизических и геодезических параметров выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} V(r_i) &= \sum_{\mu=0}^m \alpha_{\mu} \cdot \Delta g_{\text{БУГЕ}}(r_i + \Delta r_{\mu}) \\ V(r_i) &= \sum_{\mu=0}^m \alpha_{\mu} \cdot h(r_i + \Delta r_{\mu}) \\ V(r_i) &= \sum_{\mu=0}^m \alpha_{\mu} \cdot H_{\text{МОХО}}(r_i + \Delta r_{\mu}) \\ V(r_i) &= \sum_{\mu=0}^m \alpha_{\mu} \cdot \Delta T(r_i + \Delta r_{\mu}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для каждой из 11 эталонных точек значение представленных выше параметров было получено 5 раз: непосредственно в самой точке, а также как среднее из значений в окружностях с радиусами $\Delta r_1 = 9,5'$, $\Delta r_2 = 19'$, $\Delta r_3 = 28,5'$, $\Delta r_4 = 38'$ (угловых минут). Выбор количества окружностей и их размера выполнялся методом подбора с учетом данных о геологическом строении земной коры. Детальный анализ показал, что данный вариант для представленной тектонической структуры является наиболее оптимальным.

Для каждого из параметров по имеющимся исходным данным были построены сетки (grid) значений с шагом $3'$ угловые минуты и выполнено определение среднего значения параметра в каждой из окружностей. В среднем количество значений параметра для каждого радиуса окружностей составил: $\Delta r_1 = 31$, $\Delta r_2 = 123$, $\Delta r_3 = 307$, $\Delta r_4 = 600$ (рисунок 4).

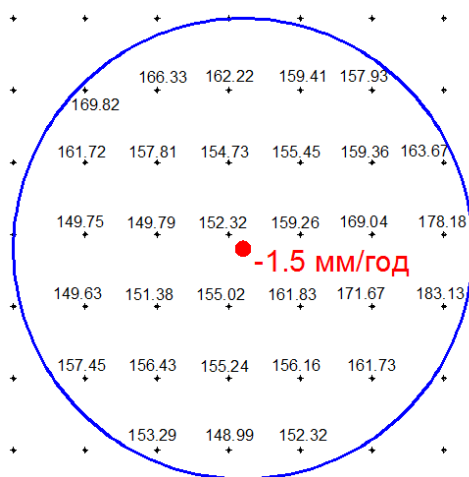


Рисунок 4. – Определение среднего значения отметки рельефа в окружности Δr_1

³ International Centre for Global Earth Models. URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de>.

Составляя и решая нормальные уравнения относительно $[\alpha_\mu]$, $\mu = 0, 1, 2, 3, 4$, были найдены коэффициенты и средние квадратические ошибки уравнений регрессии (5) для тектонической структуры Оршанская впадина (таблица 2).

Таблица 2. – Коэффициенты и оценка точности уравнений регрессии

Параметр	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	R^2	ε , мм	$\frac{\varepsilon}{V} \cdot 100\%$
$\Delta g_{БУГЕ}$	-0,3570	0,9558	-1,2241	0,7336	-0,0705	0,88	0,18	(≈ 10 -20%)
h	0,1400	-0,2695	0,0855	0,2567	-0,2177	0,90	0,21	(≈ 20 -30%)
$H_{МОХО}$	0,0113	-2,1541	6,1253	-5,3656	1,3682	0,69	0,32	(≈ 20 -30%)
ΔT	2,8147	-6,5504	4,5134	-0,2586	-0,7007	0,65	0,40	(≈ 30 -40%)

В качестве примера в таблице 3 представлены уравнения регрессии для Оршанской впадины, найденные с использованием выражения (2) и представленные в работе [7].

Таблица 3. – Уравнения регрессии для Оршанской впадины, найденные с использованием квадратичной функции

Параметр	Уравнение регрессии	R^2	ε , мм	$\frac{\varepsilon}{V} \cdot 100\%$
$\Delta g_{БУГЕ}$	$V = -7,587 - 0,6047 \Delta g_{БУГЕ} - 0,01276 \Delta g_{БУГЕ}^2$	0,71	0,36	(≈ 20 -40%)
h	$V = -19,684 + 0,1691h - 0,00035h^2$	0,89	0,23	(≈ 20 -30%)
$H_{МОХО}$	$V = 64,841 - 2,699H_{МОХО} + 0,027528H_{МОХО}^2$	0,48	0,49	(≈ 30 -50%)
ΔT	$V = -1,0086 - 0,1967\Delta T + 0,1097\Delta T^2$	0,27	0,62	(≈ 40 -60%)

Анализируя представленные в таблицах 2 и 3 результаты, можно сделать вывод, что модели, описывающие связь скоростей СВДЗК со всеми перечисленными выше параметрами с использованием выражений (5), точнее, нежели модели, представленные в работе [7] и описывающие связь выражением (2).

В связи с тем, что между скоростями СВДЗК и всеми перечисленными параметрами наблюдается тесная корреляционная связь, то имеет смысл построить интегральное соотношение типа (5), в котором функция содержала бы несколько параметров. Вследствие того, что поиск коэффициентов уравнений регрессии должен осуществляться с использованием метода наименьших квадратов, то с учетом имеющихся у нас 11 точек с известными значениями скоростей СВДЗК в обобщенное уравнение может войти не более двух геофизических, геодезических параметров. Коэффициенты и точностные характеристики уравнений регрессии, содержащих различные варианты геофизических, геодезических параметров, представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Коэффициенты и точностные характеристики уравнений регрессии, содержащих несколько геофизических, геодезических параметров

Коэффициент/ Показатель	$\Delta g_{БУГЕ} + h$	$\Delta g_{БУГЕ} + H_{МОХО}$	$\Delta g_{БУГЕ} + \Delta T$	$h + H_{МОХО}$	$h + \Delta T$	$H_{МОХО} + \Delta T$
α_0	0,4220	0,2115	-0,5784	0,1882	-0,0550	5,4836
α_1	-0,9917	-0,0999	1,2874	-0,2775	0,0394	-8,7695
α_2	0,7275	-0,0101	-1,3974	-0,1468	0,2382	2,3234
α_3	-0,3706	-0,3754	0,8956	0,5076	-0,2707	3,0197
α_4	0,2670	0,5076	-0,1861	-0,2592	0,0457	-2,0948
α_5	0,1137	1,6333	2,0596	3,7855	4,9927	6,0267
α_6	-0,3058	2,5489	-3,3405	-4,0431	-10,2960	-11,2018
α_7	0,3133	-3,7359	0,8632	0,9654	8,2757	11,2422
α_8	0,1103	-2,4653	1,2219	-1,1959	-5,0150	-13,1241
α_9	-0,2284	2,1071	-0,8953	0,4253	2,0790	7,5349
R^2	0,98	0,90	0,81	0,90	0,97	0,96
ε , мм	0,07	0,19	0,28	0,21	0,10	0,12

Как видно из таблицы 4, регрессионные уравнения, содержащие несколько геофизических, геодезических параметров, точнее, нежели уравнения, описывающие связь скоростей СВДЗК с каким-либо одним параметром. Наиболее тесную связь имеют скорости СВДЗК с комбинацией параметров в виде аномалий ускорения силы тяжести в редукции Буге $\Delta g_{БУГЕ}$ и рельефа h . С использованием данного регрессионного уравнения была построена карта скоростей СВДЗК для территории Оршанской впадины (рисунок 5). Исходной для построения карты являлась сетка с шагом 3'*3' угловые минуты. В качестве метода интерполяции использован «Kriging». Построение карты выполнено в программном продукте Surfer.

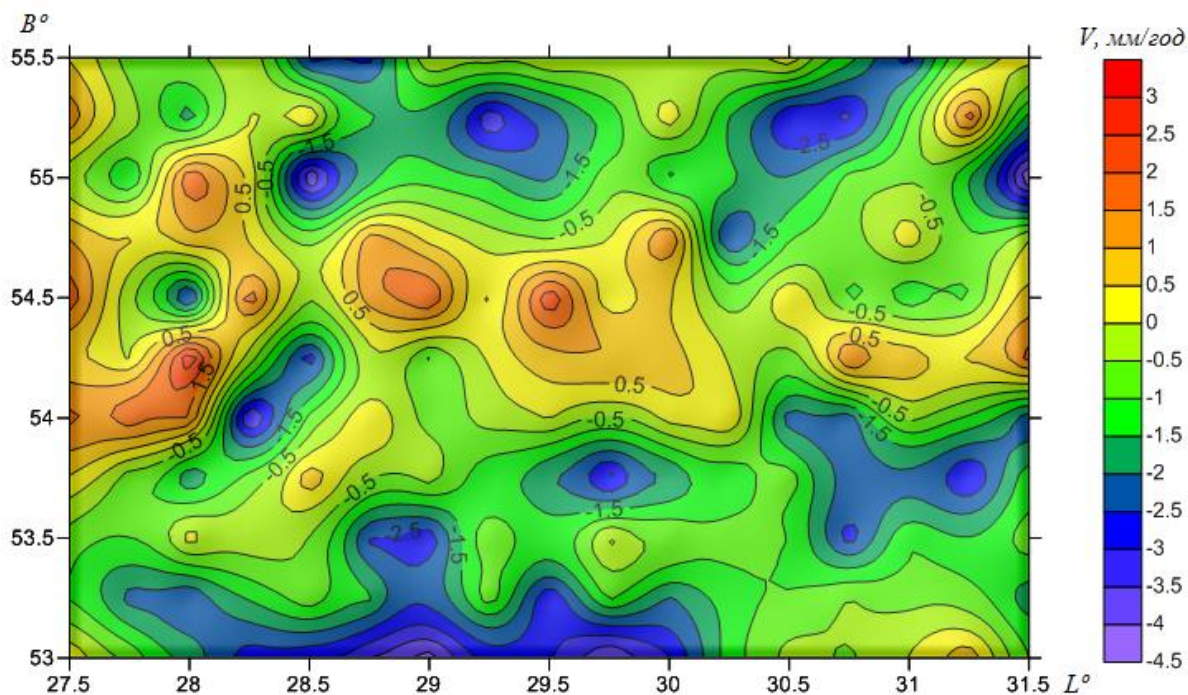


Рисунок 5. – Модельная карта скоростей СВДЗК

Оценка точности модельной карты скоростей СВДЗК представлена в таблице 5.

Таблица 5. – Оценка точности модельной карты скоростей СВДЗК

Погрешности	Модель скоростей СВДЗК в сравнении с эталонными точками
$[\Delta]/n$, мм/год	-0,08
+ Δ , max, мм/год	0,12
- Δ , max, мм/год	-0,23
Число + разностей	4
Число - разностей	7
СКП, мм/год	0,17

Анализируя модельную карту (см. рисунок 5), можно отметить, что она имеет достаточную точность и достоверность для практического использования. Для исследуемой территории Оршанской впадины скорости СВДЗК изменяются от +3 мм/год до -4 мм/год, что соответствует карте скоростей СВДЗК, построенной в [7]. Сопоставление модельных значений скоростей СВДЗК с «Картой современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР»⁴ показало значительные расхождения скоростей.

Заключение. Результаты прогнозирования возможных значений скоростей СВДЗК с использованием комплексной методики геологической интерпретации геофизических полей и математического аппарата Г.И. Каратаева, Б.П. Ватлина, Т.Л. Захаровой позволяют сделать ряд выводов:

- использование для прогнозирования интегрального соотношения типа (3), полученного в работе Г.И. Каратаева, Б.П. Ватлина, Т.Л. Захаровой, позволяет существенно повысить точность поиска коэффициентов уравнений связи скоростей СВДЗК с различными параметрами земной коры;
- выбор количества окружностей и их размера для составления интегрального соотношения (3) выполняется, как правило, методом подбора с учетом данных о геологическом строении земной коры;
- регрессионные уравнения связи, содержащие несколько геофизических, геодезических параметров в зависимости от их комбинации, имеют большую точность, нежели уравнения, описывающие связь скоростей СВДЗК с каким-либо одним параметром;
- применение метода линейного интерполирования при прогнозировании скоростей СВДЗК ведет к ошибкам прогнозирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каратаев, Г.И. Методика геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий / Г.И. Каратаев, Б.П. Ватлибин, Т.Л. Захарова. – Новосибирск : Наука, 1973. – 169 с.

⁴ См. сноску 2.

2. Грушинский, Н.П. Введение в гравиметрия и гравиметрическую разведку / Н.П. Грушинский. – М. : МГУ, 1961. – 206 с.
3. Маловичко, А.К. Основной курс гравиразведки / А.К. Маловичко. – Пермь : Изд-во Перм. гос. ун-та, 1960. – 324 с.
4. Сорокин, Л.В. Гравиметрия и гравиметрическая разведка / Л.В. Сорокин. – М. : Гостоптехиздат, 1953. – 484 с.
5. Колмогорова, П.П. Прогнозирование скоростей современных вертикальных движений земной коры с помощью корреляционной модели по статическим геолого-геофизическим данным / П.П. Колмогорова, Г.И. Каратаев // Методические вопросы исследования современных движений земной коры / ред. Э.Э. Фотиади. – Новосибирск : ИГиГ СО АН СССР, 1975. – С. 182–203.
6. Каратаев, Г.И. Корреляционная схема геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий / Г.И. Каратаев. – Новосибирск : Недра, 1966. – 136 с.
7. Маркович, К.И. Прогнозирование скоростей современных вертикальных движений земной коры по геодезическим, геолого-геофизическим и сейсмологическим данным / К.И. Маркович // Геодинамика и тектонофизика. – 2020. – Т. 11, № 2. – С. 365–377. DOI: 10.5800/GT-2020-11-2-0480.

REFERENCES

1. Karataev, G.I., Vatlin, B.P. & Zakharova, T.L. (1973). *Metodika geologicheskoi interpretatsii gravitatsionnykh i magnitnykh anomalii*. Novosibirsk: Nauka. (In Russ.).
2. Grushinskii, N.P. (1961). *Vvedenie v gravimetriyu i gravimetricheskuyu razvedku*. Moscow: MGU. (In Russ.).
3. Malovichko, A.K. (1960). *Osnovnoi kurs gravirazvedki*. Perm: Izd-vo Perm. gos. un-ta. (In Russ.).
4. Sorokin, L.V. (1953). *Gravimetriya i gravimetricheskaya razvedka*. Moscow: Gostoptekhizdat. (In Russ.).
5. Kolmogorova, P.P. & Karataev, G.I. (1975). Prognostirovanie skorostei sovremennykh vertikal'nykh dvizhenii zemnoi kory s pomoshch'yu korrelyatsionnoi modeli po staticheskim geologo-geofizicheskim dannym. In E.E. Fotiadi (Eds.) *Metodicheskie voprosy issledovaniya sovremennykh dvizhenii zemnoi kory* (182–203). Novosibirsk: IGI SO AN SSSR. (In Russ.).
6. Karataev, G.I. (1966). *Korrelyatsionnaya skhema geologicheskoi interpretatsii gravitatsionnykh i magnitnykh anomalii*. Novosibirsk: Nedra. (In Russ.).
7. Markovich, K.I. (2020). Prognostirovanie skorostei sovremennykh vertikal'nykh dvizhenii zemnoi kory po geodezicheskim, geologo-geofizicheskim i seismologicheskim dannym [Forecasting the speeds of modern vertical movements of the earth's crust according to geodetic, geological, geophysical and seismological data]. *Geodinamika i tektonofizika [Geodynamics & tectonophysics]*, 11 (2), 365–377. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.5800/GT-2020-11-2-0480.

Поступила 01.11.2022

**USE OF COMPLEX TECHNIQUE OF GEOLOGICAL INTERPRETATION
OF GEOPHYSICAL FIELDS FOR PREDICTION OF POSSIBLE VALUES OF VELOCITIES
OF MODERN VERTICAL MOVEMENTS OF THE EARTH'S CRUST**

K. MARKOVICH, V. YALTYKHOV, A. DEGTJAREV, M. MAKARAVA
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article considers the possibility of predicting the velocities of modern vertical movements of the earth's crust using a complex method of geological interpretation of the geophysical fields of Arkhangelsk – Fedynsk – Fotiadi. The search for links between the velocities of modern vertical movements of the earth's crust with anomalous gravitational and magnetic fields, the topography of the day surface, and the thickness of the earth's crust for one geological structure of the territory of the Republic of Belarus in the form of the Orsha depression was performed. To search for links, the integral relation of Karataev – Vatlin – Zakharova was used. Based on the results of forecasting, a model map of the velocities of modern vertical movements of the Earth's crust was constructed. The map has sufficient accuracy and reliability for practical use.

Keywords: *velocities of modern vertical movements of the Earth's crust, anomalies of the acceleration of gravity in the Bouguer reduction, relief, thickness of the earth's crust, magnetic anomalies, correlation equations.*

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Бакатович А.А., Чжан И, Гаспар Ф.</i> Изоляционные композиты на основе смеси рисовой лузги и соломы	2
<i>Давидович А.С., Давидович Т.Л., Кремнёва Е.Г.</i> Особенности архитектурно-композиционного решения костела в д. Солы	10
<i>Жук В.В., Матвеев Е.С.</i> Сопоставительный анализ отечественных и зарубежных норм расчета соединений деревянных элементов нагельного типа	16
<i>Козунова О.В., Сирош К.А.</i> Учет физической нелинейности ортотропных плит в статическом расчете бесконечной регулярной системы плит на упругом слое	22
<i>Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Лазовский Е.Д., Гиль А.И.</i> Расчетная модель напряженно-деформированного состояния статически неопределимых железобетонных конструкций	29
<i>Леонович С.Н., Шалый Е.Е., Литвиновский Д.А., Степанова А.В., Журавская А.В., Малюк В.В.</i> Проникновение хлоридов в бетон: анализ экспериментальных исследований	45
<i>Невдах А.А., Кривицкий П.В.</i> Влияние сжатой зоны бетона на сопротивление срезу железобетонных балок....	51
<i>Новосельцев В.Г., Новосельцева Д.В.</i> Оценка работоспособности системы водяного отопления, не соответствующей проекту.....	58
<i>Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д.</i> Закачка воды в подземный водоносный пласт скважины из пылевидного и средне-мелкозернистого песка при малом водопотреблении.....	64
<i>Романюк В.Н., Струцкий Н.В.</i> Оценка общего уровня повреждаемости изоляционных покрытий стальных подземных распределительных газопроводов	71
<i>Yagubkin A., Zhixu Z.</i> Methods for remote quality control of composites with organic aggregates	78

ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Волчек А.А., Таратенкова М.А.</i> Оценка содержания растворенного кислорода в поверхностных водах Беларуси	82
<i>Поспелов А.В., Мацукевич И.В., Касач А.А., Комаров М.А., Рожко С.Н.</i> Коррозия углеродистых сталей в дезинфицирующих растворах.....	89
<i>Филатов В.В., Вандышева К.В.</i> Методика и результаты изучения динамического состояния геологической среды урбанизированной территории (на примере Екатеринбургского мегаполиса)	94

ГЕОДЕЗИЯ

<i>Макарова М.В., Маркович К.И., Шевелев И.П.</i> Мониторинг трансформации земель приграничных территорий по материалам дистанционного зондирования земли	102
<i>Маркович К.И., Ялтыхов В.В., Дегтярев А.М., Макарова М.В.</i> Использование комплексной методики геологической интерпретации геофизических полей для прогноза возможных значений скоростей современных вертикальных движений земной коры	107