УДК 628.1; 004.9; 004.8
DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-32-38

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОДОПРОВОДНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СЕТЕЙ

С. В. Окладникова, Г. Б. Абуова

Окладникова Светлана Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и моделирования, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Российская Федерация; e-mail: okladnikova.s.v@yandex.ru;

Абуова Галина Бекмуратовна, кандидат технических наук, доцент кафедры пожарной безопасности и водопользования, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Российская Федерация; e-mail: isipb@aucu.ru

Представлена интеллектуальная информационная система поддержки принятия решений для гидравлического расчета водопроводных кольцевых сетей. Новизна системы заключается в гибридном алгоритме, объединяющем продукционную модель расчета водопотребления (с учетом демографии, износа сетей и сезонности) с классическим гидравлическим расчетом по методу Лобачева – Кросса. Система поддерживает сценарный анализ (оптимистический, наиболее вероятный, пессимистический сценарии) и формирует рекомендации по корректировке параметров сети. Апробация на типовом примере кольцевой сети показала, что пессимистический сценарий (учет износа 30 % и летнего сезона) увеличивает невязку в кольце с 0,038 до 0,58 м, требуя либо увязочных итераций, либо увеличения диаметра труб. Система сокращает время многовариантных расчетов в 3–5 раз по сравнению с ручным пересчетом в табличных процессорах.

Ключевые слова: *интеллектуальная система, поддержка принятия решений, продукционная модель, гидравлический расчет, кольцевая сеть, сценарный анализ, цифровой двойник, водоснабжение.*

INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE DESIGN OF RING WATER SUPPLY NETWORKS

S. V. Okladnikova, G. B. Abuova

Okladnikova Svetlana Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Automated Design and Modeling Systems Department, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation; e-mail: okladnikova.s.v@ya.ru;

Abuova Galina Bekmuratovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Fire Safety and Water Management Department, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation; e-mail: isipb@aucu.ru

An intelligent decision support system for the hydraulic calculation of ring water supply networks is presented. The novelty of the system lies in a hybrid algorithm that integrates a production rule-based model for water consumption calculation (accounting for demographics, network wear, and seasonality) with the classical hydraulic calculation using the Lobachev-Cross method. The system supports scenario analysis (optimistic, most likely, and pessimistic scenarios) and generates recommendations for adjusting network parameters. Testing on a typical ring network example showed that the pessimistic scenario (considering 30% wear and the summer season) increases the loop imbalance from 0.038 to 0.58 m, requiring either balancing iterations or an increase in pipe diameters. The system reduces the time of multivariate calculations by 3–5 times compared to manual recalculation in spreadsheet processors.

Keywords: *intelligent system, decision support, production model, hydraulic calculation, ring network, scenario analysis, digital twin, water supply.*

Введение (Introduction)

Объект исследования – гидравлический расчет кольцевых водопроводных сетей населенных пунктов на этапе предпроектного анализа. Кольцевые сети – наиболее распространенный тип систем водоснабжения благодаря надежности: при отключении одного участка вода поступает по альтернативным путям [1, 11, 13]. Их проектирование сопряжено с вычислительной сложностью из-за необходимости выполнения второго закона Кирхгофа, что достигается итерационной увязкой расходов по методу Лобачева – Кросса [2, 12].

Существующие программные комплексы [1, 3, 5, 24] требуют задания единственного расхода, не учитывают демографию, износ сетей и сезонность [17, 18], не содержат механизмов поддержки принятия решений и ориентированы на узкоспециализированных пользователей [10]. Современные тенденции цифровизации водоснабжения требуют перехода к интеллектуальным системам поддержки принятия решений (DSS), использующим метрики гидравлической связности и оценки критичности элементов сети [22].

Проблемы интеллектуализации водоснабжения находятся в фокусе исследователей [4, 7, 16]. Однако классические увязочные методы чувствительны к начальному распределению расходов [5, 15]. В доступной литературе отсутствуют работы, интегрирующие продукционную модель водопотребления в гидравлический расчет кольцевой сети с поддержкой сценарного анализа [3, 14].

Актуальность исследования определяется отсутствием интеллектуальных систем, сочетающих продукционное моделирование с гидравлическим расчетом кольцевой сети, необходимостью цифровизации проектирования с учетом региональных особенностей [8, 9] и потребностью в инструментах поддержки принятия решений.

Цель – разработка и апробация прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия решений для гидравлического расчета кольцевых сетей с возможностью сценарного анализа водопотребления.

Задачи:

1) разработать продукционную модель трех сценариев водопотребления (оптимистический, вероятный, пессимистический) и алгоритм ее интеграции в гидравлический расчет по методу Лобачева – Кросса;

2) реализовать гибридную модель программно с использованием базы данных для хранения справочной информации [20];

3) выполнить экспериментальную апробацию на типовом примере кольцевой сети и сравнительный анализ трех сценариев.

Метод (Methods)

Для решения задачи сценарного гидравлического расчета кольцевых водопроводных сетей предложен гибридный подход, объединяющий продукционную модель водопотребления и гидравлическое ядро на основе метода Лобачева – Кросса. Продукционная модель генерирует физически обоснованные сценарии нагрузки на сеть, а гидравлическое ядро выполняет их численную верификацию.

В основе продукционной модели лежат правила «ЕСЛИ – ТО» для трех факторов: износа трубопроводов (K_{cond}), сезонных колебаний (K_{season}) и демографической структуры ($K_{children}$). Значения коэффициентов (табл. 1) получены на основе данных водоснабжающих организаций [9] и экспертных оценок. Базовый расход $q_{база}$ определен по СП 31.13330.2021 [18]. Предлагаемый подход к сценарному моделированию соответствует современной методологии интеграции неопределенности в оценку работы водопроводных сетей, учитывающей как износ инфраструктуры, так и эксплуатационные факторы [24].

Таблица 1

Сценарии водопотребления, генерируемые системой

№ п/п	Сценарий	K_{cond}	K_{season}	$K_{children}$	Физическая интерпретация
	1	2	3	4	5
1	Оптимистический	1,0	1,0	1,0	Новые сети, зимний период, без детей
2	Наиболее вероятный	1,15	1,1	1,08	Износ 30–50 %, лето, умеренный полив, дети 3–7 лет
3	Пессимистический	1,3	1,2	1,15	Износ > 50 %, жаркое лето, интенсивный полив, дети до 3 лет

Сценарный часовой расход рассчитывается по формуле (1):

$$q_{сценарий} = q_{база} \bullet K_{cond} \bullet K_{season} \bullet K_{children}. \quad (1)$$

Для каждого сценария выполняется итерационная увязка расходов [13, 22] по единой последовательности:

1) удельный расход: $q_{уд} = q_{час,max} / \sum l_{расч}$, где $\sum l_{расч}$ – сумма расчетных длин участков (для жилой застройки – фактическая длина, на границе районов – половина, для незастроенной территории – 0) [5, 14];

2) путевые и узловые расходы: $q_{пут} = q_{уд} \bullet l_{расч}$; $q_{узл} = 0,5 \bullet \sum q_{пут} + q_{соср}$. Контрольное условие: сумма всех узловых расходов должна равняться общему расходу, подаваемому в сеть, с учетом коэффициента неучтенных нужд [18];

3) предварительное распределение расходов и направлений по участкам выполняется вручную (из-за бесконечного множества решений, удовлетворяющих первому закону Кирхгофа) [5];

4) подбор диаметров труб из таблиц Шевелева [20] по расходу q и допустимому интервалу скоростей (0,7–1,5 м/с) выбирается ближайший стандартный диаметр. Определяются удельное сопротивление A, поправочный коэффициент d и полное сопротивление участка $S = A \bullet d \bullet l_{факт}$;

5) потери напора: $\Delta h = S \bullet (0,001 \bullet q)^2$. Знак «+» – направление по часовой стрелке, «–» – против. Невязка кольца: $\sum \Delta h = \sum \Delta h^+ - \sum \Delta h^-$;

6) проверка сходимости. Если абсолютное значение невязки меньше 0,5 м [18], то расчет завершен. Иначе вычисляется поправочный расход, единый для всех участков кольца (2):

$$\Delta q = -\frac{\Sigma \Delta h}{2 \cdot \Sigma (S \cdot q) \cdot 0,001} \cdot 1000 \quad (2)$$

Знак «минус» уменьшает невязку. Поправка прибавляется к расходам с совпадающим направлением и вычитается при противоположном. При смене знака расхода направление движения инвертируется. Цикл повторяется до достижения допустимых невязок (максимум 50 итераций).

На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма. Заключительный этап – блок поддержки принятия решений, формирующий рекомендации по увеличению диаметров или корректировке расходов.

Как показано на схеме, процесс начинается с ввода исходных данных. Продукционная модель генерирует три сценария водопотребления, которые последовательно обрабатываются гидравлическим ядром. При превышении невязки (0,5 м) выполняется увязочная итерация с пересчетом поправочного расхода. После сходимости блок поддержки принятия решений формирует рекомендации: цветовую индикацию проблемных участков, предложения по увеличению диаметров или увязке с указанием Δq. Это не заменяет инженера, но сокращает время анализа и снижает риск пропуска проблемных узлов.

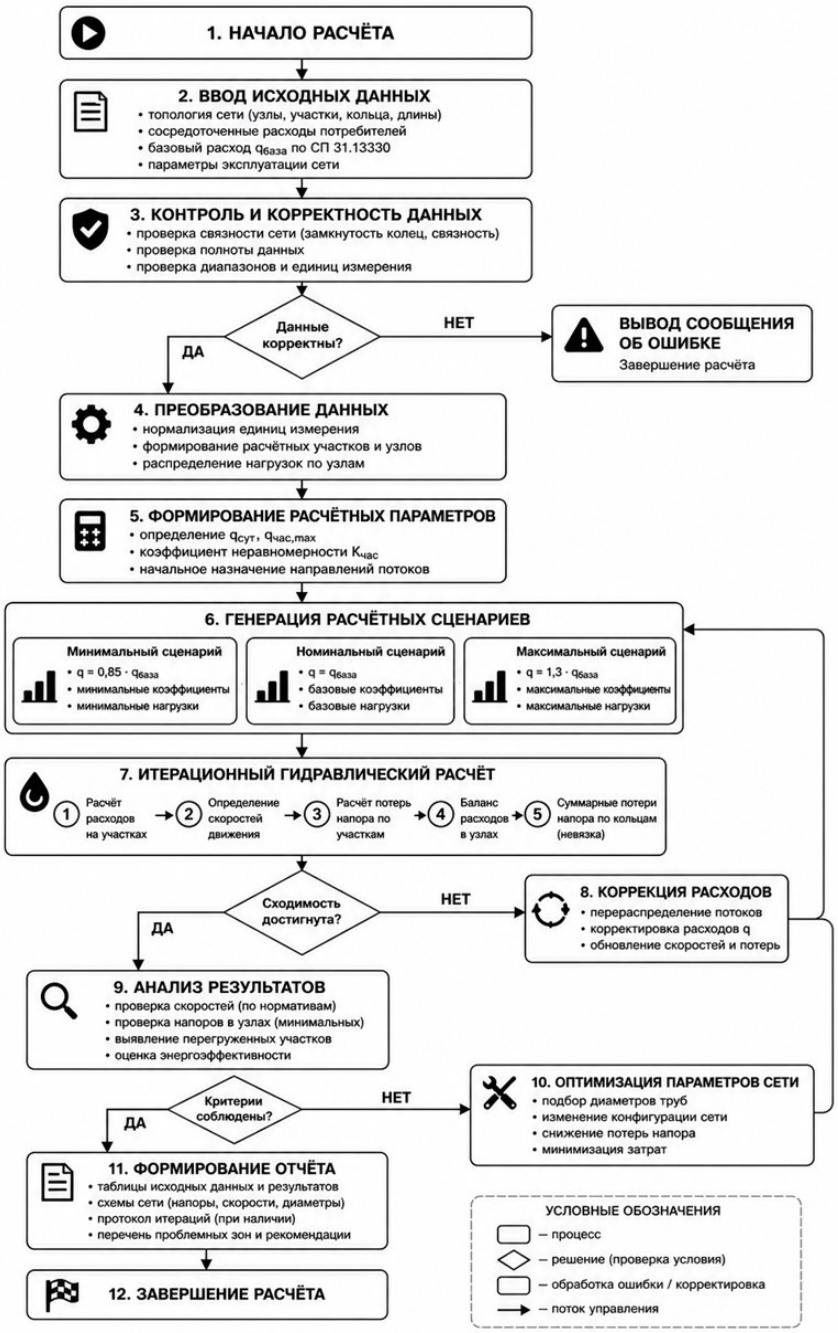

Рис. 1. Блок-схема гибридного алгоритма работы интеллектуальной системы поддержки принятия решений (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Block diagram of the hybrid algorithm of the intelligent decision support system (illustration by the authors)

Предложенный метод реализован в программном прототипе и апробирован на типовой кольцевой сети из [3]: четыре узла (узел 1 – питающий), четыре участка (1-2, 2-3, 3-4, 4-1), образующих одно кольцо. Длина каждого участка – 400 м (жилая застройка), трубы чугунные новые. Минимальный диаметр – 100 мм [5], диапазон скоростей — 0,7–1,5 м/с. К узлу 3 подключен потребитель с $q_{соср} = 15$ л/с. Базовый расход $q_{база} = 102$ л/с [18].

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Применение продукционной модели (табл. 1) к базовому расходу $q_{база} = 102$ л/с позволило получить три сценария водопотребления (табл. 2), различающихся уровнем нагрузки на сеть.

Пессимистический сценарий почти вдвое превышает оптимистический благодаря совместному действию трех факторов. Такие сочетания характерны для многих населенных пунктов Астраханской области, где износ водопроводных сетей превышает 50–60 % [8, 9].

Для наиболее вероятного сценария ($q_{час,max} = 102$ л/с) выполнен полный гидравлический расчет в соответствии с изложенным выше методом.

Таблица 2

Сценарии водопотребления, сгенерированные системой

№ п/п	Сценарий	$q_{час,max}$, л/с	K_{cond}	K_{season}	$K_{children}$
	1	2	3	4	5
1	Оптимистический	85	1,0	1,0	1,0
2	Наиболее вероятный	102	1,15	1,1	1,08
3	Пессимистический	133	1,3	1,2	1,15

Суммарная расчетная длина участков – 1600 м, удельный расход $q_{уд}$ = *0,06375* л/с·м, путевой расход на каждом участке – *25,5* л/с.

Узел 3 (промпредприятие) имеет расход 40,5 л/с – вдвое больше остальных (табл. 3), что требует особого внимания к примыкающим участкам.

Таблица 3

Узловые расходы для вероятного сценария

№ п/п	Узел	Примыкающие участки	$\sum q_{пут}$, л/с	$0{,}5\sum q_{пут}$, л/с	$q_{соср}$, л/с	$q_{узл}$, л/с
	1	2	3	4	5	6
1	1	1-2, 4-1	51,0	25,5	0	25,5
2	2	1-2, 2-3	51,0	25,5	0	25,5
3	3	2-3, 3-4	51,0	25,5	15,0	40,5
4	4	3-4, 4-1	51,0	25,5	0	25,5
5	Сумма					117,0

Сумма узловых расходов (*117* л/с) совпадает с величиной $q_{час,max}$, увеличенной на 15 % для учета неучтенных нужд (*102 · 1,15 = 117,3* л/с).

Невязка в кольце (табл. 4) составила 0,0375 м – ниже допустимого порога 0,5 м [18], поэтому увязка не требуется. Скорости во всех трубах находятся в допустимом диапазоне 0,7–1,5 м/с.

Аналогичные расчеты выполнены для всех сценариев (табл. 5).

Таблица 4

Гидравлический расчет сети для вероятного сценария

№ п/п	Участок	q, л/с	Направление	d, мм	V, м/с	S	Δh, м	Знак
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1-2	50	право	150	0,85	18,5	0,046	+
2	2-3	30	право	125	0,92	32,0	0,029	+
3	3-4	10	право	100	0,68	85,0	0,0085	+
4	4-1	52	лево	150	0,89	17,2	0,046	–

Таблица 5

Сравнение гидравлических параметров по трем сценариям

№ п/п	Сценарий	$q_{час,max}$, л/с	Невязка в кольце, м	Требуется увязка	Δq, л/с	Рекомендация системы
	1	2	3	4	5	6
1	Оптимисти-ческий	85	0,022	нет	–	Диаметры 100 мм достаточны
2	Наиболее вероятный	102	0,038	нет	–	Диаметры 100 мм достаточны
3	Пессимисти-ческий	133	0,58	да	–1,8	Увеличить d*d* на уч. 3–4 до 125 мм или выполнить увязку

Наблюдается нелинейный рост невязки: при увеличении расхода с 102 до 133 л/с (+30 %) невязка возрастает более чем в 15 раз. Это объясняется квадратичной зависимостью потерь напора от расхода [20] и подтверждает необходимость сценарного анализа: «усредненный» расчет может скрывать перегрузку сети. Для пессимистического сценария система выполнила увязку (Δq = −1,8Δq = −1,8 л/с) и сформировала две альтернативы: увязка (без изменения диаметров) или увеличение диаметра на участке 3-4 до 125 мм. Предоставление альтернатив – характерная черта систем поддержки принятия решений [7].

Для оценки места разработанной системы среди аналогов проведено сравнение по ключевым функциональным критериям (табл. 6).

В отличие от распространенных гидравлических пакетов [6, 21, 25], разработанная система включает продукционную модель водопотребления, поддерживает сценарный анализ, автоматически генерирует рекомендации и сохраняет историю проектов в базе данных.

Продукционная модель успешно генерирует три сценария, отражающих реальные эксплуатационные условия. Пессимистический сценарий (133 л/с) выявляет скрытую перегрузку сети, не видимую при нормативном расчете, что особенно важно для регионов с высоким износом сетей [8, 9].

Таблица 6

Сравнение разработанной системы с существующими решениями

№ п/п	Критерий	ZuluHydro [6]	СТОКС [7]	EPANET [9]	Разработанная система
	1	2	3	4	5
1	Продукционная модель водопотребления	нет	нет	нет	есть
2	Сценарный анализ (3 сценария)	нет	нет	нет	есть
3	Автоматическая генерация рекомендаций	нет	нет	нет	есть
4	Хранение истории проектов в СУБД	нет	нет	нет	есть
5	Цветовая индикация проблемных участков	частично	нет	нет	есть
6	Бесплатное распространение	демо	частично (до 25 объектов)	да	да

Система не только фиксирует превышение невязки, но и предоставляет инженеру альтернативы корректировки, соответствуя концепции поддержки принятия решений [4, 16]. Ни один из популярных аналогов не реализует встроенных механизмов сценарного анализа и продукционного моделирования.

Ограничения метода: начальное распределение расходов выполняется вручную (фундаментальная причина – бесконечное множество решений, удовлетворяющих первому закону Кирхгофа). Автоматизация этого этапа требует методов оптимизации [10]. Другие ограничения: калибровка коэффициентов по данным Астраханской области (требуется адаптация для других регионов) и отсутствие учета переходных процессов. Альтернативные подходы к моделированию кольцевых водопроводных сетей, включая методы симуляции и анализа блокировок участков, демонстрируют потенциал для повышения надежности результатов еще на этапе предварительного проектирования [21].

Заключение (Conclusions)

В результате выполненного исследования разработана и апробирована интеллектуальная информационная система поддержки принятия решений для гидравлического расчета водопроводных кольцевых сетей:

1) формализована продукционная модель водопотребления, включающая правила типа «ЕСЛИ – ТО» для трех ключевых факторов: износа трубопроводов (K_{cond} = 1,0 ÷ 1,3), сезонных колебаний (K_{season} = 1,0÷ 1,2) и демографической структуры населения ($K_{children}$ = 1,0 ÷ 1,15). Модель генерирует три сценария часового расхода (оптимистический, вероятный, пессимистический), позволяя оценить диапазон нагрузок на сеть;

2) разработан гибридный алгоритм, интегрирующий продукционную модель в гидравлический расчет по методу Лобачева – Кросса, включающий расчет расходов, подбор диаметров, вычисление потерь напора и невязок, итерационную увязку и формирование рекомендаций;

3) реализован программный прототип с трехуровневой архитектурой (база данных, гидравлическое ядро, пользовательский интерфейс с цветовой индикацией проблемных участков);

4) экспериментальная апробация на типовом примере (четыре узла, четыре участка, одно кольцо) подтвердила работоспособность подхода. Для вероятного сценария (102 л/с) невязка – 0,038 м, скорости – 0,68–0,92 м/с (увязка не требуется). Для пессимистического (133 л/с) невязка – 0,58 м, система рекомендовала увязку (Δq = −1,8л/с) или увеличение диаметра на участке 3–4 до 125 мм;

5) показана эффективность по сравнению с аналогами (ZuluHydro, СТОКС, EPANET): система поддерживает сценарный анализ, содержит продукционную модель, формирует рекомендации и сохраняет историю проектов. Время многовариантного расчета сокращено более чем в 20 раз;

6) сформулированы рекомендации для практического применения. Система может использоваться на этапе предпроектного анализа для выявления скрытых рисков перегрузки сети, для обоснования инвестиционных программ (через коэффициент K_{cond} можно оценить эффект от снижения износа сетей), а также в учебном процессе при подготовке инженеров-проектировщиков в области водоснабжения и водоотведения.

Перспективы дальнейших исследований: автоматизация начального распределения расходов, расширение продукционной модели (насосное оборудование, внутрисуточная неравномерность), интеграция с ГИС, веб-версия, подключение к SCADA-системам.

Список литературы

1. Абрамов Н.Н. Расчет водопроводных сетей : учеб. пособие для вузов. — М. : Стройиздат, 1983. — 278 с.
2. Абрамов Н.Н., Поспелова М.М. Расчет кольцевых водопроводных сетей // Водоснабжение и санитарная техника. — 1980. — № 7. — С. 12–15.
3. Балкизов А.Б., Сасиков А.С., Амшоков Б.Х., Ахматов М.М. Программа для расчета параметров водоснабжения населенного пункта. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025691051. — 2025.
4. Балкинов В.И. Искусственный интеллект в сфере ВКХ // Перспектива XXI. — 2024. — № 1. — С. 42–50.
5. Барбул М.Л. Современные методы расчета сетей водоснабжения // Инновации и инвестиции. — 2021. — № 2. — С. 137–140.
6. Гидросистема : программа для гидравлического расчета [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://ascon.ru/products/955.

7. Жмудь В.А., Асет А., Ахметова А.М., Абдилдаева А.А. Оптимизация с помощью искусственного интеллекта давления воды в диспетчеризации водоснабжения // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. — 2025. — С. 65–72.
8. Зарипова В.М., Петрова И.Ю., Лежнина Ю.А. Системы обеспечения качества жизни в умном городе // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2019. — № 4(30). — С. 127–135.
9. Иванкова М.А., Костюченко Т.В., Саттарова Д.И., Мартиросов Э.Г. Отечественный опыт определения потребности в инженерной инфраструктуре при градостроительном развитии территорий // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2024. — № 4(50). — С. 65–70.
10. Игнаткина Д.О., Геращенко А.А., Текушин Д.В. и др. Реализация замкнутой системы водоснабжения промышленного предприятия как основа ресурсосбережения // Вестник Волгоградского ГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. — 2025. — № 2(99). — С. 113–126.
11. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. — Л. : Стройиздат, 1973. — 408 с.
12. Лобачев В.Г. Гидравлический расчет водопроводных сетей : теория и практика. — М. : Стройиздат, 1976. — 215 с.
13. Николадзе Г.И., Сомов М.А. Водоснабжение : учебник для вузов. — М. : Стройиздат, 1995. — 688 с.
14. Окладникова С.В., Войнова В.С., Абуова Г.Б. Программный модуль определения расчетных расходов воды для населенного пункта. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU № 2025666181, 24.06.2025.
15. Оценка расчетных параметров надежности работы водопроводной сети с учетом внутриквартальных трубопроводов / А.К. Стрелков, С.Ю. Теплых, П.А. Горшкалев, В.С. Ерофеев // Водоснабжение и санитарная техника. — 2025. — № 10. — С. 14–21.
16. Сапрыгина У.Б., Пешков В.В. Цифровые технологии при разработке проектной документации внутренних систем водоснабжения и водоотведения // Вестник науки. — 2026. — Т. 4, № 2(95). — С. 511–525.
17. СП 8.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Наружное противопожарное водоснабжение. Требования пожарной безопасности. — М. : МЧС России, 2020. — 48 с.
18. СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. — М. : Минстрой России, 2021. — 180 с.
19. СТОКС : программа для гидравлического расчета трубопроводов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://pipecalc.ru/ru.
20. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб : справочное пособие. — 8-е изд. — М. : БАСТЕТ, 2007. — 336 с.
21. Aleksandar B., Zoran M., Viktor I. Methodology of Simulation, Modeling and Examination of Ring-Type Water Supply Networks // Mechanical Engineering Scientific Journal. — 2022. — Vol. 40, No. 2. — P. 111–116. — DOI: 10.55302/MESJ22402657111b.
22. Carneiro J., Loureiro D., Cabral M., Covas D. Integrating Uncertainty in Performance Assessment of Water Distribution Networks by Scenario Building // Water. — 2024. — Vol. 16, No. 7. — P. 977. — DOI: 10.3390/w16070977.
23. EPANET : программное обеспечение для гидравлического моделирования водопроводных сетей [Электронный ресурс]. — US EPA. — Режим доступа: https://www.epa.gov/water-research/epanet (дата обращения: 01.05.2026).
24. Marlim M.S., Kang D. Hydraulic Connectiveness Metric for the Analysis of Criticality in Water Distribution Networks // Water. — 2024. — Vol. 16, No. 11. — P. 1498. — DOI: 10.3390/w16111498.
25. ZuluHydro : официальный сайт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.politerm.com/products/hydro/zuluhydro.

Reference

1. Abramov N.N. Raschet vodoprovodnyh setej : ucheb. posobie dlja vuzov. Moscow: Strojizdat, 1983. 278 p.
2. Abramov N.N., Pospelova M.M. Raschet kol'cevyh vodoprovodnyh setej // Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika. 1980. No. 7. P. 12–15.
3. Balkizov A.B., Sasikov A.S., AmShokov B.H., Ahmatov M.M. Programma dlja rascheta parametrov vodosnabzhenija naselennogo punkta. Svidetel'stvo o registracii programmy dlja JeVM No. 2025691051. 2025.
4. Balkinov V.I. Iskusstvennyj intellekt v sfere VKH // Perspektiva XXI. 2024. No. 1. P. 42–50.
5. Barbul M.L. Sovremennye metody rascheta setej vodosnabzhenija // Innovacii i investicii. 2021. No. 2. P. 137–140.
6. Gidrosistema : programma dlja gidravlicheskogo raschjota [Electronic resource]. URL: https://ascon.ru/products/955.
7. Zhmud' V.A., Aset A., Ahmetova A.M., Abdildaeva A.A. Optimizacija s pomoshh'ju iskusstvennogo intellekta davlenija vody v dispetcherizacii vodosnabzhenija // Avtomatizacija i izmerenija v mashino-priborostroenii. 2025. P. 65–72.
8. Zaripova V.M., Petrova I.Ju., Lezhnina Ju.A. Sistemy obespechenija kachestva zhizni v umnom gorode // Inzhenerno-stroitel'nyj vestnik Prikaspija. 2019. No. 4(30). P. 127–135.
9. Ivankova M.A., Kostjuchenko T.V., Sattarova D.I., Martirosov Je.G. Otechestvennyj opyt opredelenija potrebnosti v inzhenernoj infrastrukture pri gradostroitel'nom razvitii territorij // Inzhenerno-stroitel'nyj vestnik Prikaspija. 2024. No. 4(50). P. 65–70.
10. Ignatkina D.O., Gerashhenko A.A., Tekushin D.V. et al. Realizacija zamknutoj sistemy vodosnabzhenija promyshlennogo predprijatija kak osnova resursosberezhenija // Vestnik Volgogradskogo GASU. Ser.: Stroitel'stvo i arhitektura. 2025. No. 2(99). P. 113–126.
11. Kurganov A.M., Fjodorov N.F. Spravochnik po gidravlicheskim raschjotam sistem vodosnabzhenija i kanalizacii. Leningrad: Strojizdat, 1973. 408 p.
12. Lobachjov V.G. Gidravlicheskij raschjot vodoprovodnyh setej : teorija i praktika. Moscow: Strojizdat, 1976. 215 p.
13. Nikoladze G.I., Somov M.A. Vodosnabzhenie : uchebnik dlja vuzov. Moscow: Strojizdat, 1995. 688 p.
14. Okladnikova S.V., Vojnova V.S., Abuova G.B. Programmnyj modul' opredelenija raschjotnyh rashodov vody dlja naseljonnogo punkta. Svidetel'stvo o registracii programmy dlja JeVM RU No. 2025666181, 24.06.2025.
15. Strelkov A.K., Teplyh S.Ju., Gorshkalev P.A., Erofeev V.S. Ocenka raschetnyh parametrov nadezhnosti raboty vodoprovodnoj seti s uchetom vnutrikvartal'nyh truboprovodov // Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika. 2025. No. 10. P. 14–21.
16. Saprygina U.B., Peshkov V.V. Cifrovye tehnologii pri razrabotke proektnoj dokumentacii vnutrennih sistem vodosnabzhenija i vodootvedenija // Vestnik nauki. 2026. Vol. 4, No. 2(95). P. 511–525.

17. SP 8.13130.2020. Sistemy protivopozharnoj zashhity. Naruzhnoe protivopozharnoe vodosnabzhenie. Trebovanija pozharnoj bezopasnosti. Moscow: MChS Rossii, 2020. 48 p.
18. SP 31.13330.2021. Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzhenija. Moscow: Minstroj Rossii, 2021. 180 p.
19. STOKS : programma dlja gidravlicheskogo raschjota truboprovodov [Electronic resource]. URL: https://pipecalc.ru/ru.
20. Shevelev F.A., Shevelev A.F. Tablicy dlja gidravlicheskogo raschjota vodoprovodnyh trub : spravochnoe posobie. 8th ed. Moscow: BASTET, 2007. 336 p.
21. Aleksandar B., Zoran M., Viktor I. Methodology of Simulation, Modeling and Examination of Ring-Type Water Supply Networks // Mechanical Engineering Scientific Journal. 2022. Vol. 40, No. 2. P. 111–116. DOI: 10.55302/MESJ22402657111b.
22. Carneiro J., Loureiro D., Cabral M., Covas D. Integrating Uncertainty in Performance Assessment of Water Distribution Networks by Scenario Building // Water. 2024. Vol. 16, No. 7. P. 977. DOI: 10.3390/w16070977.
23. EPANET: software for hydraulic modeling of water supply networks [Electronic resource]. US EPA. URL: https://www.epa.gov/water-research/epanet (accessed: 01.05.2026).
24. Marlim M.S., Kang D. Hydraulic Connectiveness Metric for the Analysis of Criticality in Water Distribution Networks // Water. 2024. Vol. 16, No. 11. P. 1498. DOI: 10.3390/w16111498.
25. ZuluHydro: official website [Electronic resource]. URL: https://www.politerm.com/products/hydro/zuluhydro.

© С. В. Окладникова, Г. Б. Абуова

Ссылка для цитирования:
Окладникова С. В., Абуова Г. Б. Интеллектуальная информационная система поддержки принятия решений при проектировании водопроводных кольцевых сетей // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 32–38.

УДК 691.32
DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-38-43

ВЛИЯНИЕ МОРОЗНОЙ ДЕСТРУКЦИИ И ПРИРОДНОГО УВЛАЖНЕНИЯ НА КАРБОНИЗАЦИЮ БЕТОНА

С. А. Логинова, Е. А. Корсакова, А. Д. Нерубенко

Логинова Светлана Андреевна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Строительство зданий и сооружений», Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Российская Федерация, тел.: + 7 (906) 617-12-27; e-mail: sl79066171227@yandex.ru;

Корсакова Елизавета Антоновна, магистрант, Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Российская Федерация, тел.: + 7 (920) 122-16-10; e-mail: korsakovaea.20@edu.ystu.ru;

Нерубенко Артем Дмитриевич, студент, Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Российская Федерация; тел.: + 7 (910) 815-78-45; e-mail: nerubenkoad.23@edu.ystu.ru

В статье рассматривается комплексное влияние климатических факторов – морозной деструкции и природного увлажнения — на процессы карбонизации бетона в условиях Ярославской области. Проведен анализ механизмов воздействия циклов замораживания–оттаивания и естественной влажности на структуру и проницаемость бетона, что определяет скорость проникновения в него углекислого газа. На основе выполненных расчетов и экспериментальных данных выявлены особенности изменения свойств бетона под влиянием указанных факторов. Установлено, что морозная деструкция, разрушая структуру материала, способствует ускорению карбонизации, тогда как природное увлажнение, напротив, замедляет этот процесс за счет изменения проницаемости и влажности поверхностных слоев. Полученные результаты позволяют уточнять прогноз долговечности железобетонных конструкций в регионе и разработать рекомендации по повышению их устойчивости к климатическим воздействиям. Особое внимание уделено необходимости учета совместного действия природных факторов при проектировании и эксплуатации объектов.

Ключевые слова: *бетон, карбонизация бетона, природная влажность, морозная деструкция, долговечность.*

THE EFFECT OF FROST DESTRUCTION AND NATURAL MOISTURE ON CONCRETE CARBONATION

S. A. Loginova, Ye. A. Korsakova, A. D. Nerubenko

Loginova Svetlana Andreyevna, Candidate of Technical Sciences, Head of Construction of Buildings and Structures Department, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation, phone: + 7 (906) 617-12-27; e-mail: sl79066171227@yandex.ru;

Korsakova Yelizaveta Antonovna, undergraduate student, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation, phone: + 7 (920) 122-16-10; e-mail: korsakovaea.20@edu.ystu.ru;

Nerubenko Artem Dmitriyevich, student, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation, phone: + 7 (910) 815-78-45; e-mail: nerubenkoad.23@edu.ystu.ru

This article examines the combined effects of climatic factors - frost degradation and natural moisture - on concrete carbonation in the Yaroslavl region. An analysis is provided of the mechanisms by which freeze-thaw cycles and natural moisture influence the structure and permeability of concrete, which determines the rate of carbon dioxide penetration. Calculations and experimental data are used to identify changes in concrete properties under the influence of these factors. It is established that frost degradation, by disrupting the structure of the material, accelerates carbonation, while natural moisture, conversely, slows this process by altering the permeability and moisture content of the surface layers. The obtained results make it possible to refine the durability forecast for reinforced concrete structures in the region and develop recommendations for improving their resilience to climatic influences. Particular attention is paid to the need to consider the combined effects of natural factors during the design and operation of structures.

Keywords: *concrete, concrete carbonation, natural moisture, frost destruction, durability.*