

УДК 519.6:628.14

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.007

Методы анализа и обеспечения показателей качества воды в водопроводных сетях с контурами замкнутой циркуляции

Алексеев Александр Владимирович, Новицкий Николай Николаевич

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

Россия, Иркутск, alexeev@isem.irk.ru

Аннотация. В статье рассмотрена проблема расчета качества воды в водопроводных сетях с контурами замкнутой циркуляции. Проведенный обзор работ по моделированию качества воды в системах водоснабжения показал, что существует большое число факторов, влияющих на качество воды в системах водоснабжения. Наиболее широкое распространение на практике получило обеззараживание воды хлором. На концентрацию хлора в воде накладываются двусторонние ограничения, и эксплуатационные организации обязаны поддерживать требуемую концентрацию хлора до крана каждого потребителя. В процессе транспортировке воды концентрация хлора снижается из-за взаимодействия с материалом труб и растворенными веществами. Таким образом, одним из основных показателей качества воды может являться ее возраст. Существующие модели расчета возраста воды не позволяют рассчитать возраст воды в системах водоснабжения при наличии контуров замкнутой циркуляции. Предложен топологический алгоритм расчета возраста воды в сетях с контурами замкнутой циркуляции. Программная реализация алгоритма интегрирована в информационно-вычислительный комплекс «АНГАРА-ВС» и апробирована на условных и реальных примерах СВС. Программная реализация алгоритма показала высокую вычислительную эффективность и может быть применена на практике при анализе режимов систем водоснабжения. Показано, что существуют всего несколько способов управления качеством воды в системах водоснабжения. Предложен новый подход к управлению качеством воды, основанный на создании контуров замкнутой циркуляции. Данный подход требует минимальных капитальных и эксплуатационных расходов по сравнению с другими известными способами. Представленный подход носит универсальный характер и может быть применен для расчета различных параметров качества транспортируемой среды в любых трубопроводных системах.

Ключевые слова: система водоснабжения, качество воды, возраст воды, хлорирование воды, управление качеством воды, контур замкнутой циркуляции

Цитирование: Алексеев А.В. Методы анализа и обеспечения показателей качества воды в водопроводных сетях с контурами замкнутой циркуляции / А.В. Алексеев, Н.Н. Новицкий // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 68-79. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.007.

Введение. Качество воды в системах водоснабжения городов имеет первостепенное значение, так как от него напрямую зависит здоровье жителей. К сожалению, несмотря на все предпринимаемые усилия, качество воды в источниках, используемых для водоснабжения, продолжает снижаться. На сегодняшний день в мире более 3 млрд. человек не имеют доступа к чистой питьевой воде. Практически все источники подвергаются антропогенному и техногенному воздействию разной интенсивности. Проблема качества питьевой воды актуальна как в глобальном масштабе, так и в рамках отдельно взятого региона или населенного пункта.

Качество воды в системах водоснабжения (СВС) определяется составом и количеством примесей в ней. Можно выделить две категории примесей, влияющих на качество воды у потребителей: 1) изменяющиеся в процессе транспорта; 2) постоянные, т.е. концентрация которых в воде сохраняется в процессе транспортировки и зависит от качества воды на источнике. Повлиять на вторую категорию можно исключительно с помощью очистки воды на источнике. Наибольший интерес представляет первая категория, поскольку концентрация примесей этой категории зависит от потокораспределения.

Очистку питьевой воды до требуемых показателей (в РФ для питьевой воды нормируется содержание свыше 1500 веществ) осуществляют, как правило, на источнике водоснабжения.

В зависимости от типа загрязнения прибегают к химической, механической, физико-механической, ультрафиолетовой и др. видам очистки и их комбинациям. При этом вода достигает требуемых показателей по мутности, запаху, привкусу, содержанию солей и газов. Отдельно выделяют процесс обеззараживания воды, т.е. уничтожение имеющихся в воде бактерий и микробов. Для этого используется обеззараживание воды ультрафиолетом и хлором. В отличие от химических соединений, концентрация бактерий и микробов в процессе транспорта может изменяться вследствие их размножения. На сегодняшний день в мире в более чем 99% СВС для снижения концентрации бактерий используют хлорирование.

Хлор применяется для обеззараживания воды уже более 200 лет. Впервые в 1895 году в Нью-Йорке начали хлорировать водопроводную воду. Согласно нормативным требованиям, концентрация хлора в воде для ее обеззараживания должна находиться в диапазоне 0,7-3 мг/л в зависимости от типа источника (подземный или поверхностный). В тоже время остаточная доза хлора у потребителя принимается равной 0,3-0,5 мг/л (согласно СанПиН 2.1.4.1074-01) и водоснабжающая организация должна обеспечить качество воды до каждого крана, а не только в точке подачи воды в сеть. Низкая концентрация хлора ведет к росту бактерий в СВС. Повышение концентрации хлора ведет к образованию тригалометанов [1], что негативно влияет как на здоровье людей, так и ускоряет процесс коррозии металлических труб [22]. Таким образом, на практике одним из главных параметров, характеризующим качество воды в СВС, является концентрация остаточного хлора. Концентрация остаточного хлора, в свою очередь, зависит от ряда характеристик сети, главной из которых является время транспорта воды. При наличии в сети контуров замкнутой циркуляции (КЗЦ) определить возраст воды общепринятыми методами становится невозможно. Вопросам определения возраста воды в СВС с КЗЦ посвящена данная работа.

1. Имеющиеся модели расчета и управления качеством. Работы по созданию моделей оценки качества воды в системах водоснабжения (СВС) ведутся уже более 30 лет. Достаточно полный обзор исследований по контролю и управлению качеством воды в СВС приведен в [3]. На сегодняшний день существует значительное количество технологий очистки воды и контроля роста бактерий [4, 5]. Для подавления роста болезнетворных бактерий, как правило, применяется дезинфицирование воды хлором [2], как один из наиболее дешевых, эффективных и доступных (для производства, хранения и транспортировки) методов, поскольку растворимый в воде хлор продолжает препятствовать росту бактерий, в отличие, например, от ультрафиолетового обеззараживания, эффективного лишь в месте потребления воды.

Одним из первых алгоритм распространения хлора в системах водоснабжения предложил Лоу [6] (совместная модель гидравлики и качества воды в СВС). Алгоритм прогноза качества воды в СВС рассмотрен в [7]. Алгоритм расчета времени транспорта воды в СВС с установившимся режимом представлен в [8].

При транспортировке воды к потребителям концентрация хлора СВС снижается, из-за взаимодействия со стенками труб и распада хлора [9-13], вследствие взаимодействия с растворенными в воде веществами (азот, сульфаты, железо, органика и т.д.) [14]. Эти два процесса принято рассматривать независимо друг от друга. Значительная часть исследований посвящена оценке скорости распада хлора в зависимости количества органических соединений в воде, начальной концентрации хлора [15], температуры [16], возраста воды [17], материала [12], диаметра и возраста труб [18-20], скорости течения [21,22], наличия станций хлорирования [23,24] и др. В работе [25] показано, что динамика режимов также оказывает заметное влияние на качество воды. Методология оценки остаточной концентрации хлора для систем водоснабжения с прерывистой подачей воды предложена в [26]. Развитие и широкое

распространение модели расчета качества воды в EPANET [27] повлияло на стандарты оценки качества воды СВС и позволило эксплуатационным предприятиям точнее оценить качество воды в своих системах. История развития модели качества воды, используемой в EPANET, приведена в [27]. В работе [28] приведено сравнение моделей распада хлора 1 и 2 порядка в пакете EPANET MSX.

Для управления качеством воды за счет сокращения времени транспорта воды предложены алгоритмы закрытия задвижек на сети [29]. В работе [30] предложено использование эволюционного алгоритма для отключения участков сети с целью снижения времени транспорта (фактически создание из кольцевой сети древовидной). В работе [31] предложены алгоритмы планирования совместной работы насосных и станций хлорирования для поддержания максимально высокой концентрации хлора в СВС. В [32] рассмотрена задача минимизации инъекций хлора в определенных точках сети для поддержания его требуемого уровня. Показано, что в таком случае удастся снизить количество используемого хлора, по сравнению с хлорированием воды только на источнике. В работе [33] для древовидной сети решена задача определения мест установки станций хлорирования и величины необходимых доз хлора для поддержания оптимального уровня остаточного хлора в сети.

Алгоритм динамического моделирования качества воды для отслеживания растворенных веществ в водораспределительных сетях представлен в [34]. В работе [35] проведено сравнение нескольких известных вычислительных методов расчета качества воды (основанных на методах Эйлера и Лагранжа) и сделаны выводы об их эффективности.

Проведенный обзор показал, что основная часть работ направлена на изучение факторов, влияющих на скорость распада хлора в СВС. В общем виде скорость распада хлора в трубопроводе может быть представлена уравнением первого порядка (1) или второго порядка (2) [36].

$$C(t) = C_0 e^{-Kt}, \quad (1)$$

$$C(t) = C_0 e^{-\left(\frac{b}{1+bKC_0}\right)t}, \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация хлора, K – скорость химической реакции, которая определяется совокупностью факторов, представленных далее, t – возраст воды. Условный график зависимости концентрации хлора в воде от времени приведен на рисунке 1.

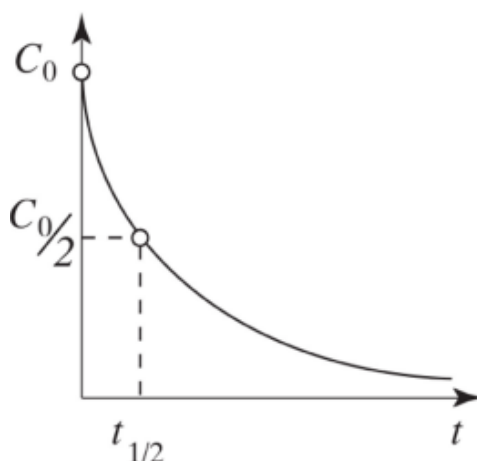


Рис. 1. Изменение концентрации хлора во времени в трубопроводе

Факторы, приводящие к снижению концентрации хлора в СВС:

- Увеличение количества органических примесей.
- Уменьшение начальной концентрации хлора.

- Увеличение температуры воды.
- Уменьшение диаметра труб.
- Увеличение возраста труб.
- Увеличение скорости течения.
- Применение металлических труб.
- Наличие нестационарных гидравлических режимов.
- Наличие резервуаров.

Обзор литературы по моделированию качества воды в СВС показал:

1. Широко исследованы модели анализа качества воды в зависимости от различных факторов. Фактически, ключевым параметром, отражающим общее качество воды в СВС, может являться возраст воды.
2. Поставленные задачи решаются преимущественно топологическими алгоритмами, которые напрямую не применимы при наличии КЗЦ. Варианты расчетов сетей с КЗЦ не рассматриваются.
3. Для обеспечения требуемого качества воды в СВС применяются различные инженерные приемы: изменение начальной концентрации хлора, оптимальная расстановка станций хлорирования, секционирование сети или повышение давления на насосных станциях с целью повышения расходов и т.д.
4. Отсутствуют регулярные методы управления качеством воды в СВС.

1. Расчет возраста воды в сетях с КЗЦ. В данной работе за основу взят подход к управлению качеством потоков в сетях с КЗЦ, описанный в [37]. Как видно из уравнений 1 и 2, скорость распада хлора напрямую зависит от времени транспорта или, иными словами, возраста воды. Таким образом, для расчета концентрации хлора необходимо знать как возраст воды в каждом узле, так и скорость распада хлора на каждом участке сети.

В общем случае для определения возраста воды необходимо провести расчет потокораспределения [38] (для определения расходов на участках) и принять предположение, что в узлах сети происходит полное смешение потоков. Тогда для узла схода потоков (рисунок 2) возраст исходящего потока может быть вычислен по формуле (3), а время транспорта воды по участку определяется скоростью воды (формула 4).

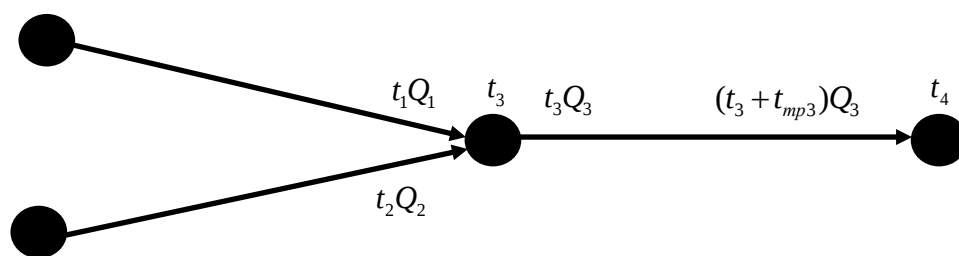


Рис. 2. Фрагмент сети со сходом потоков разных возрастов

$$t_3 = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2}{Q_1 + Q_2}, \quad (3)$$

$$t_{mp} = \frac{l}{v}, \quad (4)$$

где t_1, t_2 – возраст входящих в узел потоков воды, t_3 – возраст исходящего из узла потока, Q_1, Q_2 – расход входящих в узел потоков, $Q_3 = Q_1 + Q_2$ – расход потоков, исходящих из узла, t_{mp3} – время транспорта по трубопроводному участку №3 (с), l – длина участка (м), v – скорость воды на данном участке (м/с).

Если в сети есть КЗЦ, то вычислить возраст воды по формуле (3) не представляется возможным. Наличие КЗЦ в реальных СВС – достаточно частое явление. При этом некоторое количество воды постоянно циркулирует внутри сети (рисунок 3). Как правило, такие контуры образуются вследствие работы насосных станций (НС), и связывают выход НС с ее входом. При этом сотрудники эксплуатационных организаций, как правило, знают о наличии таких контуров, но в каждом конкретном случае находятся веские причины для их поддержания (обеспечение необходимого давления в узлах, исключение замерзания трубопровода и т.д.). При наличии КЗЦ в сети не удастся определить возраст воды в узлах контура с помощью уравнения (3), поскольку неизвестен возраст одного из входящих в узел потоков.

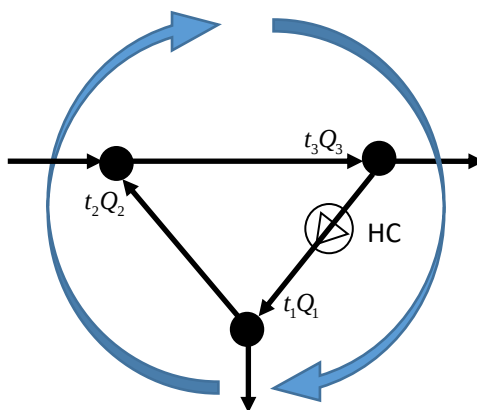


Рис. 3. Пример контура замкнутой циркуляции

На основе модели [37] реализован итеративный топологический алгоритм расчета возраста воды в сетях с КЗЦ:

1. Строится граф сети, задаются необходимые исходные данные и решается задача расчета потокораспределения для получения расходов воды на участках (ветвях графа).
2. Известными алгоритмами теории графов (например, поиск в глубину, алгоритм Флойда, алгоритм Брента) находится КЗЦ.
3. В КЗЦ находятся хорды – участки с минимальным расходом. Расход на хорде представляет собой циркуляционный расход в КЗЦ.
4. Определяются узлы схода потоков – конечные узлы хорд.
5. Для каждой хорды назначается некоторый начальный возраст воды (например, 0 или время прохождения потоком хорды).
6. Проводится расчет возраста воды в КЗЦ.
7. По результатам расчета назначается новый возраст в узлах схода потоков КЗЦ.
8. Повторять п. 5-6 до достижения требуемой точности расчета.

На каждой итерации алгоритма вычисляется невязка в узлах схода потоков КЗЦ по формуле (5).

$$\delta = Q_1 t_1 + Q_2 t_2 - Q_3 t_3. \quad (5)$$

2. Примеры расчета возраста воды в сетях с КЗЦ. Представленный алгоритм был реализован в виде программного модуля и подключен к разработанному и развиваемому в ИСЭМ СО РАН ИВК «АНГАРА-ВС» [39, 40]. На рисунке 4 представлены тестовые расчетные схемы с одним (рисунок 4.а) и двумя (рисунок 4.б) КЗЦ (схемы отличаются длинами участков и располагаемым напором на насосной станции). На схемах выделены узлы, входящие в КЗЦ и хорды. Изменение возраста воды в узлах схода потоков в процессе работы алгоритма для приведенных сетей представлены на рисунке 4 (в-г). Для сетей с 1 КЗЦ алгоритму достаточно 3-4 итерации, чтобы оценить возраст воды. Сеть с двумя контурами требует порядка 6 итераций, т.е. с ростом числа контуров число итераций возрастает.

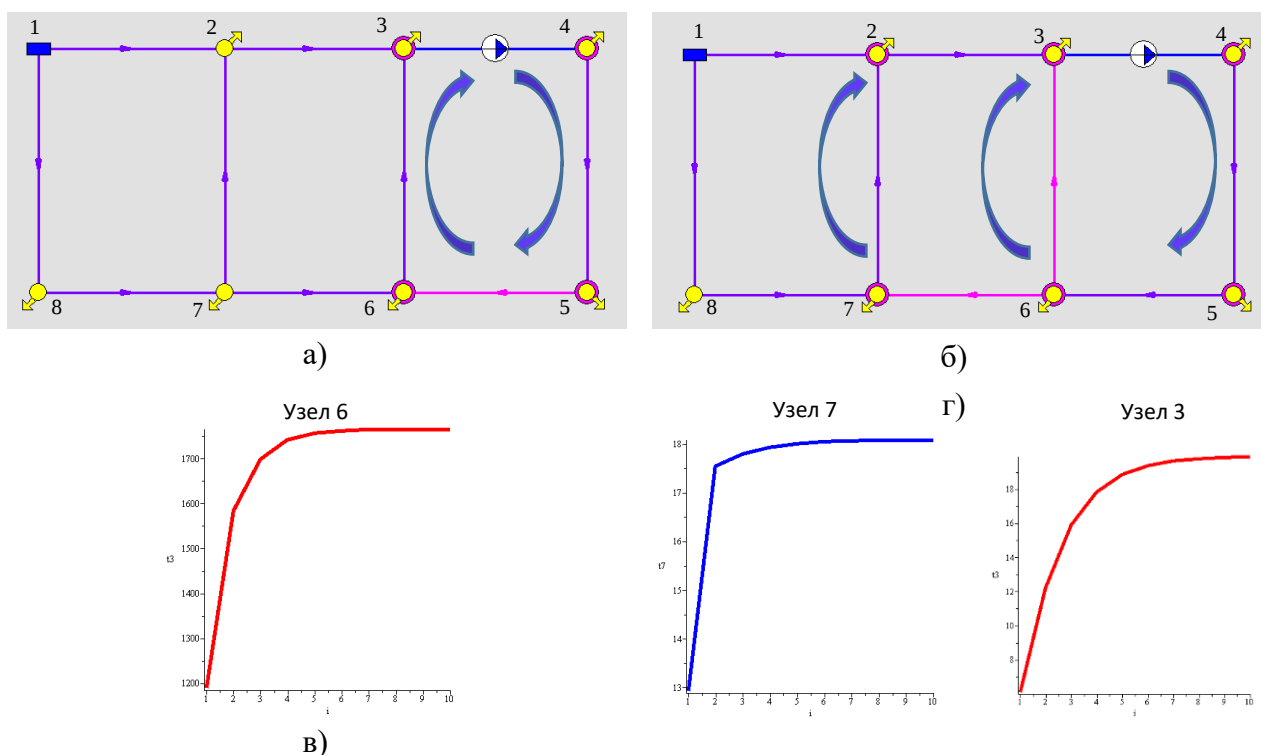


Рис. 4. Расчетная схема с одним КЗЦ (а); расчетная схема с двумя КЗЦ (б); изменение возраста в узлах схода потоков в зависимости от итерации алгоритма (в, г)

Как уже упоминалось ранее, одной из причин разработки представленного выше алгоритма являлся тот факт, что реальные СВС часто имеют КЗК. Вследствие этого оценка возраста и качества воды для таких систем вызывает затруднения. На рисунке 5 приведена реальная расчетная схема водоснабжения города, содержащая несколько КЗЦ и порядка 45 000 узлов сети. Расчет возраста воды во всех узлах данной схемы занимает менее 1 сек. Таким образом, можно констатировать, что использование предложенного алгоритма расчета возраста воды даже для сетей большой размерности не представляет вычислительных трудностей и может быть применено на практике эксплуатации СВС.

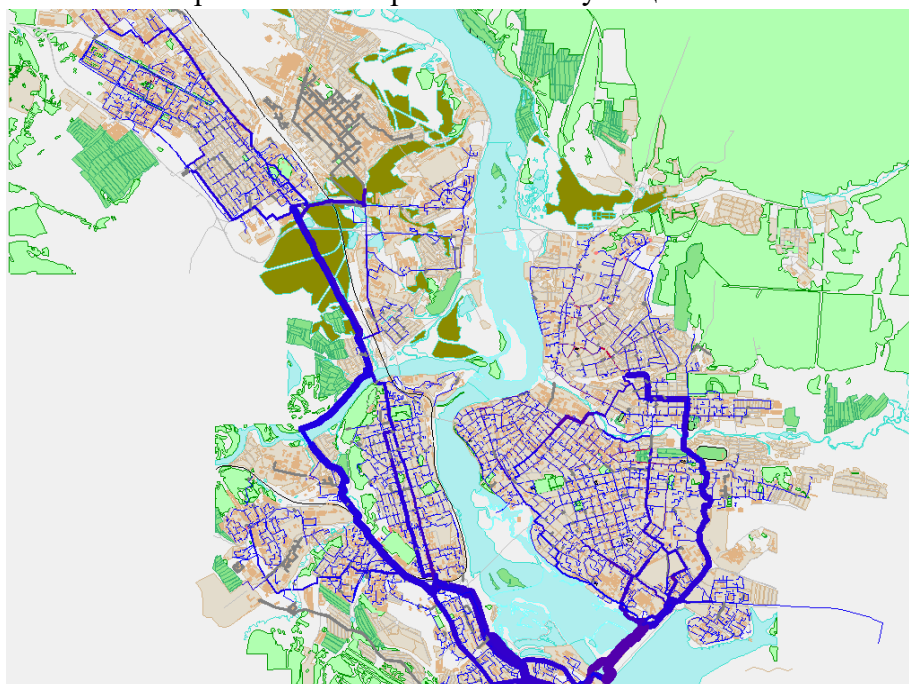


Рис. 5. Расчетная схема СВС города

Анализ результатов показал, что возраст воды у потребителей существенно различается. Наиболее близкие к источнику потребители имеют возраст в несколько часов. В то же время в сети имеются потребители (несколько десятков), возраст воды у которых достигает 30 суток. Подробный анализ схем присоединения таких потребителей позволил выявить основные причины отклонений в возрасте воды:

1. Подключение потребителей с малой нагрузкой к тупиковым сетям большого диаметра, которые остались от ликвидированных промышленных предприятий.
2. Подключение потребителей к СВС с учетом требований пожарного надзора. Часто расчетная нагрузка на пожаротушение превышает среднюю нагрузку водопотребления в 50-100 раз, а диаметр подводящего трубопровода подбирается с учетом противопожарной нагрузки.
 - 2.1. Аналогично п.2. в частном секторе с малой нагрузкой водопотребления устанавливаются пожарные гидранты, до которых прокладываются сети большего диаметра (рисунок 6.а) (Красным цветом отмечены потребители с получающие воду с возрастом свыше 3 суток).
 - 2.2. Аналогично п.2. Кроме того, что подключение новых потребителей осуществляется от двух колодцев двумя нитками трубопроводами (рисунок 6.б).



Рис. 6. Типичные схемы размещения потребителей с нарушением качества воды: а) в конце длинных улиц; б) при двухтрубной схеме подключения

Нормализация возраста и качества воды в каждом случае решается индивидуально. Там, где это допустимо, возможна перекладка трубы меньшего диаметра либо установка станции хлорирования на вводе в микрорайон/квартал (хотя это требует значительных финансовых и организационных затрат).

3. Циркуляция как способ управления качеством воды в СВС. Как уже упоминалось, на практике существуют всего несколько способов решить проблему качества воды у отдельных потребителей, но часто все эти способы оказываются неприменимы или слишком дороги. Ещё одним способом управления качеством воды в СВС является создание циркуляционного расхода воды в сети (по принципу циркуляции воды в системах теплоснабжения). Этот способ, с одной стороны, требует дополнительных эксплуатационных затрат (на насосных станциях), но с другой, позволяет понизить возраст воды, тем самым обеспечив требуемое качество. Таким образом, ставится двухкритериальная оптимизационная задача минимизации эксплуатационных затрат и повышения уровня качества воды. Причем по сравнению с установкой станций хлорирования установка циркуляционного насоса обходится на несколько порядков дешевле и не требует согласований с надзорными органами.

Энергопотребление циркуляционного насоса незначительное, т.к. для обеспечения циркуляционного расхода обычно достаточно напора в несколько метров водяного столба.

Подобный подход может быть применим к отдельным частям сети (как правило, это тупиковые потребители или группы потребителей, находящиеся на границе СВС).

Для приведенной на рисунке 5 схемы были проведены расчеты по нормализации возраста воды путем создания КЗЦ. Для фрагмента схемы (рисунок 6.а) увеличение скорости воды с 0,0017 м/с до 0,2 м/с позволило сократить возраст воды на данном участке с 6 суток до полутора часов, при этом мощность циркуляционного насоса не превысит 1 кВт. Более того, может быть рассмотрен сценарий включения циркуляционного насоса 1-2 раза в сутки для обновления воды в данном участке трубопроводе, что еще больше снизит эксплуатационные затраты.

Для схемы (рисунок 7.б) создание КЗЦ позволит увеличить скорость воды с 0,002 м/с до 0,2 м/с, что снизит возраст воды с 60 часов до 40 минут. При этом затраты электроэнергии на поддержание данного циркуляционного расхода будут минимальными (не более 20 кВт ч/сут).

Заключение.

1. Проведённый анализ литературы по расчету качества воды в СВС показал, что ключевым параметром, оценивающим качество воды, может считаться её возраст.
2. Предложен алгоритм расчета возраста воды в водопроводных сетях с КЗЦ. Программная реализация алгоритма показала достаточную вычислительную эффективность на условных и реальных схемах СВС.
3. Предложен новый способ управления качеством воды в СВС, основанный на создании циркуляционных расходов. Выявлены типичные ситуации, когда использование КЗЦ позволяет снизить возраст воды. Апробация на реальном примере СВС показала перспективность предлагаемого подхода, где с помощью создания КЗЦ удалось повысить качество воды у конечных потребителей (снизить возраст воды).
4. Представленный алгоритм носит универсальный характер и может быть применен для расчета различных параметров качества (или состава) транспортируемой среды в любых трубопроводных сетях (водо-, тепло-, нефте-, газоснабжения, технологические трубопроводы и др.).

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания ИСЭМ СО РАН (№ FWEU-2021-0002, рег. № АААА-А21-121012090012-1) Программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2025 годы.

Список источников

1. Chadik P., Chowdhury Z. Developing models for predicting trihalomethane formation potential and kinetics. . Journal AWWA, 1987, vol. 79, no.7, pp. 89-97, 1987, DOI:10.1002/j.1551-8833.1987.tb02878.x.
2. Masters S., Wang H., Pruden A., Edwards M.A. Redox gradients in distribution systems influence water quality, corrosion, and microbial ecology. Water Research, 2015, no. 68, pp. 140-149, DOI:10.1016/j.watres.2014.09.048.
3. Mala-Jetmarova H., Sultanova N., Savic D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. Environmental modelling & software, 2017, vol. 93, pp. 209-254, DOI:10.1016/j.envsoft.2017.02.009.
4. Liu G., Lut M.C., Verberk J.Q.J.C., Van Dijk J.C. A comparison of additional treatment processes to limit particle accumulation and microbial growth during drinking water distribution. Water research, 2013, vol. 47(87), 2719-2728, DOI:10.1016/j.watres.2013.02.035.
5. Aisopou A., Stoianov I. N. J.D. Graham In-pipe water quality monitoring in water supply systems under steady and unsteady state flow conditions: A quantitative assessment. Water research, 2012, no. 46, pp. 235-246m DOI:10.1016/j.watres.2011.10.058.
6. Liou C.P., Kroon J.R. Modeling the propagation of waterborne substances in distribution networks. Journal AWWA, 1987, vol. 79, no. 11, pp. 54-58.
7. Clark R., Males R. Simulating cost and quality in water distribution. Journal of water resources planning and management, vol. 111, iss. 4, pp.454-466, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1985)111:4(454).

8. Males R., Clark R., Wehrman P., Gates W. Algorithm for mixing problems in water systems. *Journal of hydraulic engineering*, 1985, no. 111(2), pp. 206-219, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:2(206).
9. Hallam N.B, West J.R, Forster C.F, et al. The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems. *Water research*, 2002, vol. 36, iss.14, pp. 3479-3488, DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00056-8.
10. Clark R.M., Goodrich J.A., Wymer L.J. Effect of the Distribution System on Drinking Water Quality. *Journal of water supply: research and technology – AQUA*, 1993, 42(1), pp. 30-38.
11. Grayman W., Clark R., Males R. Modeling distribution -system water quality: dynamic approach. *Journal of water resources planning and management*, 1988, vol. 114, no.3, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:3(295).
12. Clark R., Yang J., Impellitteri C., et al. Chlorine fate and transport in distribution systems: Experimental and modeling studies. *American water works association*, 2010, vol. 102, no. 5, pp. 144-156, DOI:10.2307/41314138.
13. Vasconcelos J., Rossman L., Grayman W., et al. Kinetics of chlorine decay. *American water works association*, 1997, vol. 89, pp. 54-65, DOI:10.1002/j.1551-8833.1997.tb08259.x.
14. Vasconcelos J.J., Boulos P.F., Grayman W. M., et al. Characterization and modeling of chlorine decay in distribution systems. *AWWA Research Foundation*, Denver, 1996.
15. Wang Y., Zhu G., Yang Z. Analysis of water quality characteristic for water distribution systems. *Journal of water reuse and desalination*, 2018, DOI:10.2166/wrd.2018.045.
16. Hua F., West J. Barker R., Forster C. Modelling of chlorine decay in municipal water supplies. *Water resource*, 1999, vol. 33, iss. 12, pp. 2735-2746, DOI:10.1016/S0043-1354(98)00519-3.
17. Effects of water age on distribution system water quality. *AWWA with assistance from economic and engineering services, Inc*, 2002.
18. Al-Jasser A.O. Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect. *Water research*, 2007, vol. 41, iss. 2, pp. 387-396, DOI:10.1016/j.watres.2006.08.032.
19. McGrath J., Maleki M., Bouchard C., et al. Bulk and pipe wall chlorine degradation kinetics in three water distribution systems. *Urban water journal*, 2021, DOI:10.1080/1573062X.2021.1893368.
20. Clark R., Haught R. Characterizing pipe wall demand: implications for water quality modeling. *Journal of water resources planning and management*, 2005, vol. 131, pp. 208-217, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:3(208).
21. Clark R. Chlorine fate and transport in drinking water distribution systems: Results from experimental and modeling studies. *Frontiers of earth science*, 2011, no. 5(4), pp. 334-340, DOI:10.1002/j.1551-8833.2010.tb10117.x.
22. Clark R., Grayman W. Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal of environmental engineering*, 1994, vol. 120, pp. 803-820, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9372(1994)120:4(803)
23. Fisher I., Kastl G., Sathasivan A. Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. *Water research*, 2011, vol. 45, iss. 16, pp. 4896-4908, DOI:10.1016/j.watres.2011.06.032.
24. Boccella D., Tryby M., Uberc J., Summersd R. A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions. *Water research*, 2003, vol. 37, iss. 11, pp. 2654-2666, DOI:10.1016/S0043-1354(03)00067-8.
25. Males R., Grayman W., Clark R. Modeling Water Quality in distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 1988, vol. 114, pp. 197-209, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:2(197).
26. Goyal R., Patel H. Analysis of residual chlorine in simple drinking water distribution system with intermittent water supply. *Applications of water science*, 2015, vol. 5:3, pp. 311-319, DOI:10.1007/s13201-014-0193-7.
27. Clark R. The USEPA's distribution system water quality modeling program: a historical perspective. *Water and environment journal*, 2015, vol 29, DOI:10.1111/wej.12132.
28. Monteiroa L. Figueiredoa D., Diasc S., et al. Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX .12th International conference on computing and control for the water industry, CCWI 2013.
29. Quintiliani C., Marquez-Calvo O., Alfonso L., et al. Multiobjective valve management optimization formulations for water quality enhancement in water distribution networks. *Journal of water resource and planning.*, 2019, vol. 145(12), 04019061, DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001133.
30. Prasad D., Walters G.A. Minimizing residence times by rerouting flows to improve water quality in distribution networks. *Engineering optimization*, 2006, 38:8, pp. 923-939, DOI:10.1080/03052150600833036.
31. Ostfeld A., Salomons E. Conjunctive optimal scheduling of pumping and booster chlorine injections in water distribution systems. *Engineering optimization*, 2006, vol. 38, no. 3, pp. 337-352, DOI:10.1080/03052150500478007.
32. Boccelli D., Tryby M., Uber J. et al. Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 1998, vol. 124, iss. 2, pp. 99-111, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1998)124:2(99).
33. Lee S., Lee H., Yoo D., et al. A comparative study on a hydraulic and water-quality analysis method for determining rechlorination injection points for a water-supply network. *Water*, 2019, 11, 697, DOI:10.3390/w11040697.

34. Rossman L., Boulos P., Airman T. Discrete volume-element method or network water-quality models. Journal of water resources planning and management, 1993, vol. 119, iss. 5, pp. 505-517, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:5(505).
35. Rossman L., Boulos P. Numerical methods for modeling water quality in Distribution systems: a comparison. Journal of water resources planning and management, 1996, vol. 122, pp. 137-146, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:2(137).
36. Tiruneh A., Debessai T., Bwembya G., Nkambule S. A mathematical model for variable chlorine decay rates in water distribution systems. Modelling and simulation in engineering, 2019, pp. 1-11, DOI:10.1155/2019/5863905.
37. Novitsky N. Mathematical models and methods for analyzing flow properties in hydraulic circuits with closed circulation circuits. E3S Web of conferences, 2020, 219, 01004, DOI:10.1051/e3sconf/202021901004.
38. Меренков А.П. Теория гидравлических цепей. / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 280 с.
39. Новицкий Н.Н. Информационно-вычислительный комплекс “АНГАРА-ВС” для моделирования крупных систем водоснабжения / Н.Н. Новицкий, А.В. Алексеев, С.Ю. Барина // Труды XVI Байкальской Всероссийской конференции “Информационные и математические технологии в науке и управлении”. Иркутск Россия. 01-10 июля 2011. – С.192-200.
40. Alexeev A., Novitsky N. The information and computing complex “ANGARA-WS” for end-to-end modeling of water supply systems when developing development schemes, scheduling modes, and dispatching management. MATEC Web of conferences: electronic edition, Irkutsk. Irkutsk: EDP Sciences, 2018, vol. 212, p. 06001, DOI 10.1051/matecconf/201821206001.

Алексеев Александр Владимирович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории трубопроводных и гидравлических систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Основные направления исследований связаны с моделированием различных типов трубопроводных систем, расчетом допустимых и оптимальных режимов, диспетчерским управлением, созданием электронных моделей и цифровых двойников трубопроводных систем. AuthorID: 187815, SPIN: 3216-1458, ORCID: 0000-0002-7596-6761, alexeev@isem.irk.ru, Россия, г.Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Новицкий Николай Николаевич. Доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией трубопроводных и гидравлических систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Основные направления исследований связаны с теорией гидравлических цепей, теорией и методами анализа, управления, оптимизации и идентификации трубопроводных систем, математическим и компьютерным моделированием, информационно-вычислительными технологиями. AuthorID: 9693, SPIN: 9551-6666, ORCID: 0000-0002-4032-8401, pipenet@isem.irk.ru, Россия, г.Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

UDC 519.6:628.14

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.007

Methods of analysis and provision of water quality indicators in water supply systems with closed circulation loops

Aleksandr V. Alekseev, Nikolay N. Novitsky

Melentiev energy systems institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, alexeev@isem.irk.ru

Abstract. The article considers the problem of calculating the quality of water in water supply systems with closed circulation loops. The conducted review of works on modeling water quality in water supply systems showed that there are many factors affecting the water quality in water supply systems. The most widespread in practice is water disinfection with chlorine. Bilateral restrictions are imposed on the concentration of chlorine in water, and operating organizations are obliged to maintain the required concentration of chlorine to the tap of each consumer. In the process of transporting water, the concentration of chlorine decreases due to interaction with the pipe material and dissolved substances. Thus, one of the main indicators of water quality can be its age. Existing models for calculating the water age do not allow calculating the age of water in water supply systems in the presence of closed circulation loops. A topological algorithm for calculating the age of water in networks with closed circulation loops is proposed. The software implementation of the algorithm is integrated into the “ANGARA-VS” information and computing complex and tested on conditional and real examples of water supply systems. The software implementation of the algorithm has shown high computational efficiency and can be applied in practice when analyzing the modes of water supply systems. It is shown that there are only a few ways to manage water quality in water supply systems. A new approach to water quality management based on the creation of closed circulation circuits is proposed. This approach requires minimal capital and operating costs compared to

other known methods. The presented approach is universal and can be used to calculate various quality parameters of the transported medium in any pipeline systems.

Keywords: water supply system, water quality, water age, water chlorination, water quality management, closed loop circulation

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (№ FWEU-2021-0002) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030.

References

1. Chadik P., Chowdhury Z. Developing models for predicting trihalomethane formation potential and kinetics. *Journal AWWA*, 1987, vol. 79, no.7, pp. 89-97, 1987, DOI:10.1002/j.1551-8833.1987.tb02878.x.
2. Masters S., Wang H., Pruden A., Edwards M.A. Redox gradients in distribution systems influence water quality, corrosion, and microbial ecology. *Water Research*, 2015, no. 68, pp. 140-149, DOI:10.1016/j.watres.2014.09.048.
3. Mala-Jetmarova H., Sultanova N., Savic D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental modelling & software*, 2017, vol. 93, pp. 209-254, DOI:10.1016/j.envsoft.2017.02.009.
4. Liu G., Lut M.C., Verberk J.Q.J.C., Van Dijk J.C. A comparison of additional treatment processes to limit particle accumulation and microbial growth during drinking water distribution. *Water research*, 2013, vol. 47(87), 2719-2728, DOI:10.1016/j.watres.2013.02.035.
5. Aisopou A., Stoianov I. N. J.D. Graham In-pipe water quality monitoring in water supply systems under steady and unsteady state flow conditions: A quantitative assessment. *Water research*, 2012, no. 46, pp. 235-246m DOI:10.1016/j.watres.2011.10.058.
6. Liou C.P., Kroon J.R. Modeling the propagation of waterborne substances in distribution networks. *Journal AWWA*, 1987, vol. 79, no. 11, pp. 54-58.
7. Clark R., Males R. Simulating cost and quality in water distribution. *Journal of water resources planning and management*, vol. 111, iss. 4, pp.454-466, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1985)111:4(454).
8. Males R., Clark R., Wehrman P., Gates W. Algorithm for mixing problems in water systems. *Journal of hydraulic engineering*, 1985, no. 111(2), pp. 206-219, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:2(206).
9. Hallam N.B, West J.R, Forster C.F, et al. The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems. *Water research*, 2002, vol. 36, iss.14, pp. 3479-3488, DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00056-8.
10. Clark R.M., Goodrich J.A., Wymer L.J. Effect of the Distribution System on Drinking Water Quality. *Journal of water supply: research and technology – AQUA*, 1993, 42(1), pp. 30-38.
11. Grayman W., Clark R., Males R. Modeling distribution -system water quality: dynamic approach. *Journal of water resources planning and management*, 1988, vol. 114, no.3, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:3(295).
12. Clark R., Yang J., Impellitteri C., et al. Chlorine fate and transport in distribution systems: Experimental and modeling studies. *American water works association*, 2010, vol. 102, no. 5, pp. 144-156, DOI:10.2307/41314138.
13. Vasconcelos J., Rossman L., Grayman W., et al. Kinetics of chlorine decay. *American water works association*, 1997, vol. 89, pp. 54-65, DOI:10.1002/j.1551-8833.1997.tb08259.x.
14. Vasconcelos J.J., Boulous P.F., Grayman W. M., et al. Characterization and modeling of chlorine decay in distribution systems. *AWWA Research Foundation*, Denver, 1996.
15. Wang Y., Zhu G., Yang Z. Analysis of water quality characteristic for water distribution systems. *Journal of water reuse and desalination*, 2018, DOI:10.2166/wrd.2018.045.
16. Hua F., West J. Barker R., Forster C. Modelling of chlorine decay in municipal water supplies. *Water resource*, 1999, vol. 33, iss. 12, pp. 2735-2746, DOI:10.1016/S0043-1354(98)00519-3.
17. Effects of water age on distribution system water quality. *AWWA with assistance from economic and engineering services, Inc*, 2002.
18. Al-Jasser A.O. Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect. *Water research*, 2007, vol. 41, iss. 2, pp. 387-396, DOI:10.1016/j.watres.2006.08.032.
19. McGrath J., Maleki M., Bouchard C., et al. Bulk and pipe wall chlorine degradation kinetics in three water distribution systems. *Urban water jornal*, 2021, DOI:10.1080/1573062X.2021.1893368.
20. Clark R., Haught R. Characterizing pipe wall demand: implications for water quality modeling. *Journal of water resources planning and management*, 2005, vol. 131, pp. 208-217, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:3(208).
21. Clark R. Chlorine fate and transport in drinking water distribution systems: Results from experimental and modeling studies. *Frontiers of earth science*, 2011, no. 5(4), pp. 334-340, DOI:10.1002/j.1551-8833.2010.tb10117.x.
22. Clark R., Grayman W. Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal of environmental engineering*, 1994, vol. 120, pp. 803-820, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9372(1994)120:4(803)
23. Fisher I., Kastl G., Sathasivan A. Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. *Water research*, 2011, vol. 45, iss. 16, pp. 4896-4908, DOI:10.1016/j.watres.2011.06.032.

24. Boccellia D., Trybyb M., Uberc J., Summersd R. A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions. *Water research*, 2003, vol .37, iss. 11, pp. 2654-2666, DOI:10.1016/S0043-1354(03)00067-8.
25. Males R., Grayman W., Clark R. Modeling Water Quality in distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 1988, vol. 114, pp. 197-209, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:2(197).
26. Goyal R., Patel H. Analysis of residual chlorine in simple drinking water distribution system with intermittent water supply. *Applications of water science*, 2015, vol. 5:3, pp. 311-319, DOI:10.1007/s13201-014-0193-7.
27. Clark R. The USEPA's distribution system water quality modeling program: a historical perspective. *Water and environment journal*, 2015, vol 29, DOI:10.1111/wej.12132.
28. Monteiroa L. Figueiredoa D., Diasc S., et al. Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX .12th International conference on computing and control for the water industry, CCWI 2013.
29. Quintiliani C., Marquez-Calvo O., Alfonso L., et al. Multiobjective valve management optimization formulations for water quality enhancement in water distribution networks. *Journal of water resource and planning.*, 2019, vol. 145(12), 04019061, DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001133.
30. Prasad D., Walters G.A. Minimizing residence times by rerouting flows to improve water quality in distribution networks. *Engineering optimization*, 2006, 38:8, pp. 923-939, DOI:10.1080/03052150600833036.
31. Ostfeld A., Salomons E. Conjunctive optimal scheduling of pumping and booster chlorine injections in water distribution systems. *Engineering optimization*, 2006, vol. 38, no. 3, pp. 337-352, DOI:10.1080/03052150500478007.
32. Boccelli D., Tryby M., Uber J. et al. Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 1998, vol. 124, iss. 2, pp. 99-111, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1998)124:2(99).
33. Lee S., Lee H., Yoo D., et al. A comparative study on a hydraulic and water-quality analysis method for determining rechlorination injection points for a water-supply network. *Water*, 2019, 11, 697, DOI:10.3390/w11040697.
34. Rossman L., Boulous P., Airman T. Discrete volume-element method or network water-quality models. *Journal of water resources planning and management*, 1993, vol. 119, iss. 5, pp. 505-517, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:5(505).
35. Rossman L., Boulous P. Numerical methods for modeling water quality in Distribution systems: a comparison. *Journal of water resources planning and management*, 1996, vol. 122, pp. 137-146, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:2(137).
36. Tiruneh A., Debessai T., Bwembya G., Nkambule S. A mathematical model for variable chlorine decay rates in water distribution systems. *Modelling and simulation in engineering*, 2019, pp. 1-11, DOI:10.1155/2019/5863905.
37. Novitsky N. Mathematical models and methods for analyzing flow properties in hydraulic circuits with closed circulation circuits. *E3S Web of conferences*, 2020, 219, 01004, DOI:10.1051/e3sconf/202021901004.
38. Merenkov A.P., Haselev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskih tsepei [Hydraulic circuit's theory]*. Moscow, Nauka, 1985, 280 p.
39. Novitsky N.N., Alekseev A.V., Barinova S.Yu. Informatsionno-vichislitel'nyy kompleks "ANGARA-WS" dlya modelirovaniya krupnih sistem vodosnabzheniya [Information and computing complex "ANGARA_WS" for large water supply systems modelling]. *Trudy XVI Baykal'skoy Vserossiyskoy konferentsii "Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii"*. Irkutsk Rossiya. 01-10 iyulya 2011. [Proceedings of the XVI Baikal All-Russian Conference "Information and Mathematical technologies in science and management". Irkutsk, Russia. July 01-10.], pp. 192-200.
40. Alexeev A., Novitsky N. The information and computing complex "ANGARA-WS" for end-to-end modeling of water supply systems when developing development schemes, scheduling modes, and dispatching management. *MATEC Web of conferences: electronic edition*, Irkutsk. Irkutsk: EDP Sciences, 2018, vol. 212, p. 06001, DOI 10.1051/matecconf/201821206001.

Alekseev Aleksandr Vladimirovich. *Candidate of technical sciences, senior researcher of the Laboratory of pipeline and hydraulic systems of the Melentyev energy systems institute SB RAS. The main areas of research are related to modeling various types of pipeline systems, calculating permissible and optimal modes, dispatching control, creating electronic models and digital twins of pipeline systems. AuthorID: 187815, SPIN: 3216-1458, ORCID: 0000-0002-7596-6761, alexeev@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, Lermontov str., 130.*

Novitsky Nikolay Nikolaevich. *Doctor of engineering sciences, chief researcher, head of the Laboratory of pipeline and hydraulic systems of the Melentyev energy systems institute SB RAS. The main areas of research are related to the theory of hydraulic circuits, the theory and methods of analysis, control, optimization and identification of pipeline systems, mathematical and computer modeling, information and computing technologies. AuthorID: 9693, SPIN: 9551-6666, ORCID: 0000-0002-4032-8401, pipenet@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, Lermontov str., 130.*

Статья поступила в редакцию 12.02.2025; одобрена после рецензирования 19.02.2025; принята к публикации 27.02.2025.

The article was submitted 02/12/2025; approved after reviewing 02/19/2025; accepted for publication 02/27/2025.