



УДК 628.16:681.5

doi: 10.55287/22275398_2026_60_143

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ

А. Н. Курилов
Е. Л. Царегородцев

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск

Аннотация

Рассмотрена автоматизация обезжелезивания подземной воды на установке водоподготовки предприятия по производству бутилированной питьевой воды. Предложена методология автоматизированного управления: декомпозиция процесса на стадии, выбор контролируемых параметров, трехуровневая архитектура «датчики – программируемый логический контроллер – SCADA-система» и алгоритм промывки фильтров по фактическому состоянию загрузки вместо промывки по таймеру. Расчет для напорного фильтра производительностью 6,3 м³/ч показал сокращение числа промывок с 30 до 22 и расхода промывной воды на 26,7% в месяц при защите от проскока железа в фильтрат.

Ключевые слова

Водоподготовка, питьевая вода; обезжелезивание, автоматизация, промышленный контроллер, SCADA-система, интеллектуальное управление, промывка фильтров, датчики качества воды.

Дата поступления в редакцию

29.09.2026

Дата принятия к печати

08.10.2026

Введение

Доля подземных вод в хозяйственно-питьевом водоснабжении России составляет около 45%, т. к. эти воды обладают высокой природной защищенностью от техногенных загрязнений [1]. Вместе с тем подземные воды многих регионов содержат железо/марганец в концентрациях, многократно превышающих нормативы: в подземных водах юга Тюменской области содержание общего железа составляет 1,5 – 6,0 мг/дм³ при нормативе 0,3 мг/дм³, установленном санитарными правилами и нормами (СанПиН) 1.2.3685-21 [1, 2], а в водах Республики Коми, Ханты-Мансийского автономного округа и др. регионов достигает 8 – 15 мг/л [3], а в отдельных случаях — 40 мг/л [4]. Такие воды используют не только в централизованных системах водоснабжения, но и предприятиями по производству упакованной питьевой воды, продукция которых должна соответствовать требованиям технического регламента Евразийского экономического союза (ТР ЕАЭС) 044/2017 и сохранять постоянный состав [5]. Для них стабильность обезжелезивания становится условием выпуска продукции, однако большинство устано-

вок работает по фиксированным режимам, т. е. без учета колебаний качества исходной воды. Решение связано с переходом от ручного/таймерного управления к интеллектуальным системам на базе промышленных контроллеров, корректирующим режимы по текущим показаниям датчиков [6, 7].

Целью работы являлась разработка методологии автоматизированного управления процессом обезжелезивания подземной воды на установке водоподготовки предприятия по производству бутилированной питьевой воды и расчетная оценка эффекта перехода от таймерного режима промывки фильтров к промывке по фактическому состоянию фильтрующей загрузки.

Основная часть

Для удаления железа применяют фильтрование на каталитических загрузках (марганцевый железозоудалющий фильтрующий материал (МЖФ), Birm, Greensand и др.), реагентное окисление гипохлоритом натрия, перманганатом калия, озоном и т. п. с фильтрованием, мембранные технологии и ионный обмен, упрощенную аэрацию с фильтрованием на инертной загрузке, биологическое обезжелезивание [3]. Наиболее распространена упрощенная аэрация, т.е. насыщение воды кислородом воздуха с окислением двухвалентного железа по реакции $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 10\text{H}_2\text{O} = 4\text{Fe}(\text{OH})_3\downarrow + 8\text{H}^+$ и задержанием гидроксида фильтрующей загрузкой [3, 8]. При стехиометрическом расходе 0,143 мг кислорода на 1 мг железа фактический расход на действующих станциях составляет 0,8–1,0 мг/мг, и при затоплении аэраторов в периоды максимальной подачи воды обезжелезивание остается незавершенным [9]. Полнота окисления зависит и от растворенной углекислоты, удерживающей железо в растворе: при концентрации диоксида углерода (CO_2) 60–90 мг/дм³ вакуумно-эжекционная аэрация удаляет не более 50% углекислоты, а рН повышается лишь до 7,0–7,2 [1]. Поэтому растворенный кислород и рН после аэрации также контролируются.

Основная часть затрат на обезжелезивание приходится на промывку фильтров: фильтроцикл составляет от 12 ч до 2–3 сут, а расход воды на собственные нужды достигает 5–30% [3]. В поселке Ордынское Новосибирской области фильтроцикл составил 24 ч при обработке перманганатом калия и более 48 ч при обработке гипохлоритом натрия, промывка велась с интенсивностью 7 л/(с·м²) в течение 10 мин при санитарном ограничении 48 ч [10]. Резерв экономии реализуется только при согласовании режима промывки с фактическим заполнением загрузки.

Технические средства такого согласования известны: датчики качества воды, программируемые логические контроллеры (ПЛК) и SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition — системы диспетчерского управления и сбора данных) для сбора и архивирования данных в реальном времени; при автоматизации расход реагентов снижается на 15–30%, эксплуатационные затраты — на 10–25%, электроэнергия — на 10–20% [6]. При включении элементов искусственного интеллекта возможно прогнозирование качества воды, т. е. переход от реактивного к проактивному управлению; датчики подключаются к контроллеру по интерфейсу RS-485/Modbus RTU [7].

С учетом обзора предложена методология автоматизированного управления установкой обезжелезивания из четырех этапов: декомпозиция процесса на стадии (аэрация/дегазация, окисление, фильтрование, промывка фильтров, финишная обработка перед розливом, допускаемая ТР ЕАЭС 044/2017 [5]); выбор контролируемых параметров и средств измерения; построение трехуровневой архитектуры управления; формализация алгоритма промывки с расчетной оценкой эффекта. Функциональная схема автоматизации установки, выполненная с условными обозначениями приборов по ГОСТ 21.208-2013, представлена на *рисунке 1*.

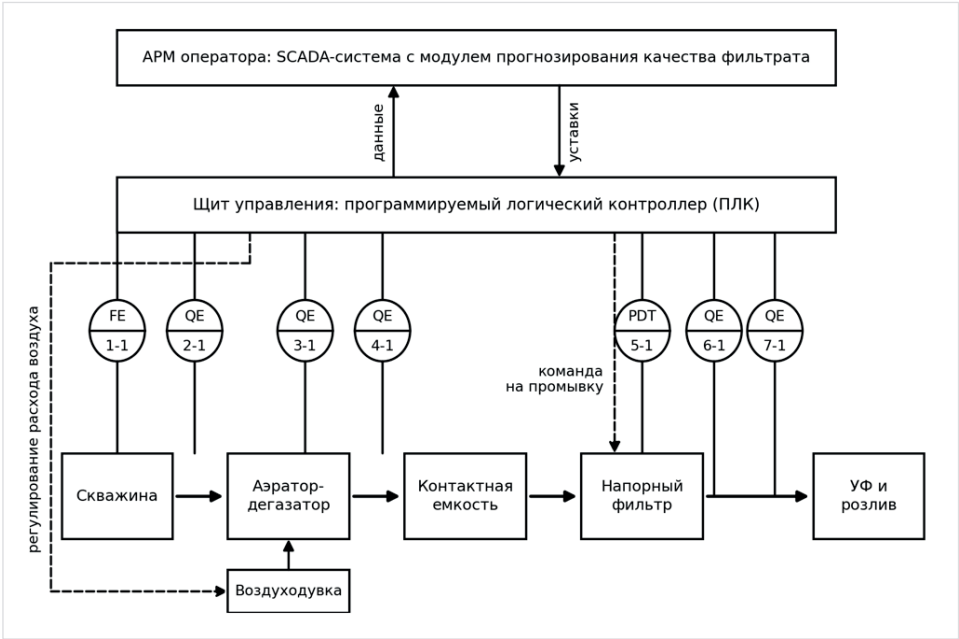


Рис. 1. Функциональная схема автоматизации установки обезжелезивания: 1-1 — расход воды; 2-1 — железо исходной воды; 3-1 — рН; 4-1 — растворенный кислород; 5-1 — перепад давления на фильтре; 6-1 — железо фильтрата; 7-1 — мутность

Контролируемые параметры и их функции в системе управления приведены в *таблице 1*.

Таблица 1

Контролируемые параметры установки обезжелезивания

Параметр	Точка контроля	Средство измерения	Функция в управлении
Общее железо, мг/дм³	исходная вода/фильтрат	колориметрический онлайн-анализатор	контроль проскока железа (норматив 0,3 мг/дм³ [2])
рН	после аэрации	потенциометрический датчик	оценка удаления СО₂ и условий окисления
Растворенный кислород, мг/дм³	после аэрации	оптический датчик	контроль достаточности окислителя
Перепад давления на фильтре, кПа	вход/выход фильтра	датчик дифференциального давления	команда на промывку
Мутность, NTU (нефелометрические единицы мутности)	фильтрат	турбидиметр	аварийный признак проскока взвеси
Расход воды, м³/ч	подающий трубопровод	электромагнитный расходомер	расчет нагрузки на фильтр

Центральным элементом алгоритма является замена промывки по таймеру промывкой по фактическим показаниям датчиков. Команда на промывку формируется при выполнении любого из трех

условий: перепад давления на фильтре достиг предельного значения для данной загрузки; концентрация железа в фильтрате превысила 80% норматива, т. е. 0,24 мг/дм³; продолжительность фильтроцикла достигла санитарного ограничения 48 ч [10].

Для расчета принят напорный фильтр производительностью 6,3 м³/ч с площадью фильтрования 0,785 м² (диаметр 1,0 м) при скорости фильтрования 8 м/ч [10]. Объем промывной воды на одну промывку при интенсивности 7 л/(с·м²) и длительности 10 мин составляет по формуле (1):

$$W = q \cdot F \cdot t = 7 \cdot 0,785 \cdot 600 = 3297 \text{ л} \approx 3,3 \text{ м}^3, \tag{1}$$

В базовом режиме промывка выполняется каждые 24 ч независимо от нагрузки, т. к. таймер настроен на наихудшее качество исходной воды. При промывке по состоянию загрузки продолжительность фильтроцикла принята обратно пропорциональной нагрузке по железу при постоянном расходе по формуле (2):

$$T = T_0 \cdot \frac{C_{max}}{C}, T \leq 48 \text{ ч}, \tag{2}$$

где $T_0 = 24$ ч — фильтроцикл при максимальной концентрации железа $C_{max} = 3,0$ мг/дм³; C — текущая концентрация железа в исходной воде. Принято, что в течение 30 сут концентрация железа последовательно составляет 1,5; 2,0 и 3,0 мг/дм³ по 10 сут, что характерно для подземных вод [1]. Результаты расчета приведены в *таблице 2*.

Таблица 2

Сравнение режимов промывки фильтра за 30 сут

Концентрация железа, мг/дм ³	Фильтроцикл по состоянию загрузки, ч	Число промывок: таймер/по состоянию	Промывная вода: таймер/по состоянию, м ³
1,5	48	10/5	33,0/16,5
2,0	36	10/7	33,0/23,1
3,0	24	10/10	33,0/33,0
Итого	–	30/22	99,0/72,6

При переходе к промывке по состоянию загрузки число промывок сокращается с 30 до 22, а расход промывной воды — на 26,4 м³, т. е. на 26,7% в месяц; пропорционально снижаются работа насоса промывки и объем промывных вод. При концентрации железа выше 3,0 мг/дм³ таймерный режим не предотвращает проскок железа в фильтрат, тогда как по сигналу анализатора железа формируется команда на внеочередную промывку, и вода сохраняет соответствие требованиям к продукции [2, 5]. Результаты получены расчетным путем, поэтому на действующей установке требуется уточнение предельного перепада давления и зависимости фильтроцикла от концентрации железа.

Заключение

Установлено, что обезжелезивание подземной воды на установках водоподготовки предприятий по производству бутилированной питьевой воды целесообразно рассматривать как объект автоматизированного управления, где концентрация железа является ключевым контролируемым показателем, а pH, растворенный кислород и перепад давления на фильтре — косвенными параметрами.

Методология включает декомпозицию процесса на стадии, выбор средств измерения, трехуровневую архитектуру «датчики – контроллер – SCADA» и алгоритм промывки фильтров по состоянию загрузки. Согласно расчету, число промывок сокращается с 30 до 22, а расход промывной воды — на 26,7% в месяц при защите от проскока железа в фильтрат. Практическая значимость состоит в возможности модернизации действующих установок без изменения технологической схемы, т. е. только за счет дооснащения датчиками и перепрограммирования контроллера.

Библиографический список

1. Матыс Е. Г., Шкилева А. А., Сидоренко О. В. Техничко-экономическое обоснование проекта реконструкции станции водоподготовки // Архитектура, строительство, транспорт. 2024. № 4. С. 55 – 67. DOI: 10.31660/2782-232X-2024-4-55-67.
2. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 21.09.2026).
3. Войтов И. В., Гудинович П. М., Еловик В. Л. Биохимические технологии очистки артезианских вод для нужд промышленного водоснабжения // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2021. № 1 (241). С. 205 – 210.
4. Клебеко П. А., Романовский В. И. Обезжелезивание подземных вод модифицированным огнеупорным шамотом // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 135 – 146. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-8.
5. ТР ЕАЭС 044/2017. Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности упакованной питьевой воды, включая природную минеральную воду»: принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 23.06.2017 № 45. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456090353> (дата обращения: 21.09.2026).
6. Копьева М. А., Чуйков С. С., Халин А. Н. Автоматизация процесса водоочистки: современные технологии и перспективы // Тюменский научный журнал. 2025. № 1 (5). С. 14 – 17. DOI: 10.24412/3034-154X-2025-1-14-17.
7. Гукасян А. В., Момотов И. В., Аксенов К. Д., Угрюмов И. С., Грачев Н. А. Автоматизация процесса контроля качества воды с использованием элементов искусственного интеллекта в производстве косметической и химической продукции // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2025. № 212. С. 30. DOI: 10.21515/1990-4665-212-030.
8. Лукашевич О. Д., Патрушев Е. И., Патрушева Н. Е., Филичев С. А. Технология и высокоэффективное оборудование для удаления железа и марганца из маломинерализованных подземных вод // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4 (51). С. 192 – 205.
9. Орлов В. О., Орлова А. М., Комаровский Д. П. Исследование системы аэрации воды при обезжелезивании // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2015. № 16. С. 114 – 120.
10. Войтов Е. Л., Сколубович Ю. Л., Рафальская Т. А., Шевцов М. Н. Подготовка подземной воды с повышенным содержанием железа и марганца для питьевого водоснабжения // Вестник

Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2 (59). С. 53–61. DOI: 10.24866/2227-6858/2024-2/53-61.

11. Сальков, Н. А. Вопросы комплексного использования водных ресурсов СССР в 60-х годах XX века / Н. А. Сальков, И. К. Дмитриев, О. В. Мельник // Системные технологии. — 2026. — № 2 (59). — С. 40–46. — DOI 10.55287/22275398_2026_59_40. — EDN DSQJIG.
12. Производительность по воздуху инъекционных систем с опускаемыми трубами для аэрирования сточных вод / М. А. Яблокова, Н. С. Зайцев, Е. А. Пономаренко, Н. В. Смирнов // Системные технологии. — 2026. — № 2 (59). — С. 68–79. — DOI 10.55287/22275398_2026_59_68. — EDN CDJDPP.
13. Алишукри, Х. М. Д. Оценка экологической эффективности трёх муниципальных станций очистки сточных вод в Эн-Наджафе (Ирак) с использованием индекса качества воды CCME-WQI / Х. М. Д. Алишукри, Н. С. Царев // Системные технологии. — 2026. — № 1 (58). — С. 82–96. — DOI 10.55287/22275398_2026_58_82. — EDN DDAZUZ.
14. Орлов, Е. В. Водозаборные сооружения войск Красной армии в период Великой Отечественной войны / Е. В. Орлов, А. О. Говорова, П. А. Шеланутин // Системные технологии. — 2025. — № 4 (57). — С. 76–83. — DOI 10.48612/dniti/2025_57_76-83. — EDN ODXNUY.
15. Орлов, Е. В. Опыт возведения полевых водопроводов в период Великой Отечественной войны / Е. В. Орлов // Системные технологии. — 2023. — № 4(49). — С. 115–119. — DOI 10.55287/22275398_2023_4_115. — EDN ZFVJVA.

AUTOMATION OF DRINKING WATER TREATMENT PROCESSES BASED ON INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS AND INDUSTRIAL CONTROLLERS

A. N. Kurilov

E. L. Tsaregorodtsev

Smolensk Branch of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Smolensk

Abstract

The automation of groundwater iron removal at the water treatment unit of a bottled drinking water plant is considered. A methodology of automated control is proposed: decomposition of the process into stages, selection of controlled parameters, a three-level architecture «sensors–programmable logic controller–SCADA system» and an algorithm of filter backwashing based on the actual state of the filter media instead of timer-based backwashing. Calculation for a pressure filter with a capacity of 6.3 m³/h showed a reduction in the number of backwashes from 30 to 22 and in backwash water consumption by 26.7% per month.

The Keywords

Water treatment, drinking water, iron removal, automation; industrial controller, SCADA system, intelligent control, filter backwashing, water quality sensors.

Date of receipt in edition

29.09.2026

Date of acceptance for printing

08.10.2026

Ссылка для цитирования:

А. Н. Курилов, Е. Л. Царегородцев. Автоматизация технологических процессов очистки питьевой воды на основе интеллектуальных систем управления и промышленных контроллеров. — Системные технологии. — 2026. — № 3 (60). — С. 143 – 149.

