



УДК 69

doi: 10.48612/dnitii/2025_57_59-75

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ШЛАМА НА ВОДООЧИСТНОЙ СТАНЦИИ СТАРОЙ КУФЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Х. М. Д. Алшукри* / **

Н. С. Царев*

* Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург

** Университет Куфы, г. Эн-Наджаф

Аннотация

Исследование посвящено комплексной оценке качества воды и свойств остаточного шлама на водоподготовительном комплексе Старой Куфы (Ирак). Объект — технологическая линия городской станции и формирующиеся остатки водоподготовки. Для анализа динамики ключевых индикаторов использованы производственные журналы за 2020–2024 гг. и лабораторные измерения, выполненные в июне–ноябре 2024 г.; рассматривались мутность, суммарная взвесь и химическое потребление кислорода. Отдельно изучена обусловленность удельного выхода шлама колебаниями качества воды Евфрата и режимами коагуляционно-флокуляционной обработки. Полученные значения сопоставлены с национальными нормативами питьевого водоснабжения и экологической безопасности; сформулированы практические следствия для устойчивого обращения с осадками: оценка риска превышений, планирование оптимизации доз реагентов, направления повторного использования и рекуперации ресурсов. Модельная часть основана на искусственной нейронной сети с входами pH , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , температура и целями «взвесь» и «удельный выход шлама»; достигнута высокая прогностическая точность ($R^2 = 0,991$). Новизна состоит в интеграции полевых и экспериментальных данных городской ВОС с ИНС-прогнозом показателей очищенной воды и образования осадка при нестабильном речном притоке. Получен прикладной инструмент чувствительного анализа влияния исходных параметров и дозирования. Установлено, что оптический показатель и суммарная взвесь являются главными детерминантами формирования осадка; зафиксирован максимальный удельный выход 278,6 кг/1000 м³, что требует корректировки реагентных режимов и заблаговременного планирования обращения со шламом. Превышения ХПК относительно предельного значения 100 мг/л указывают на экологический риск и необходимость повышения устойчивости эксплуатации, включая оптимизацию доз и разработку сценариев повторного использования и рекуперации.

Ключевые слова

Река Евфрат, мутность, очистка питьевой воды, искусственные нейронные сети, ОВВ, ХПК, Эн-Наджаф, станция Старой Куфы.

Дата поступления в редакцию

20.11.2025

Дата принятия к печати

29.11.2025

Введение

Для удовлетворения потребностей растущего населения в воде и в связи с растущими усилиями по обеспечению чистой питьевой водой примерно 29% населения мира, которое в настоящее время не имеет к ней доступа [1], постоянно растет спрос на чистую и безопасную питьевую воду. Для решения этой проблемы сырья вода должна пройти ряд процессов очистки, направленных на удаление взвешенных частиц, избытка минералов и вредных биологических загрязнителей.

Тип и концентрация загрязняющих веществ в сырой воде варьируются в зависимости от ее источника, будь то грунтовые воды или поверхностные воды, такие как реки и водохранилища. К этим загрязняющим веществам обычно относятся коллоиды, органические и неорганические вещества, растворенные твердые частицы, водоросли, микроорганизмы, а также соединения, попавшие в процесс химической очистки [2]. Одним из наиболее широко используемых методов удаления коллоидов и взвешенных частиц является добавление солей металлов для запуска процесса коагуляции и флокуляции. Однако этот процесс приводит к образованию значительного количества твердых отходов, известных как остатки водоподготовки (WTR). Исследования показали, что на каждый литр очищенной воды образуется от 10 до 30 мл WTR [3].

Большинство станций очистки поверхностных вод, использующих традиционные процессы, такие как коагуляция, флокуляция, осаждение, фильтрация, аэрация и дезинфекция, производят значительное количество шлама. Управление этими остатками или их повторное использование представляет собой серьезную экологическую проблему, требующую эффективных и устойчивых решений [2].

В процессе очистки воды, направленной на получение питьевой воды, образуется разнообразный спектр остаточных побочных продуктов, охватывающих жидкые, твердые, полутвердые и газообразные фазы. Характеристики и количество этих остатков зависят от множества факторов, включая природу исходной воды, используемые для очистки химикаты и конкретные применяемые технологические процессы. Среди этих побочных продуктов шлам водоподготовки (СВ) представляет собой важный и неизбежный остаток традиционных процессов очистки воды. Понимание состава и потенциальных сфер применения СВ крайне важно для изучения его повторного использования, особенно для адсорбции неорганических и органических загрязнителей в сточных водах и почвенных системах [4].

Характеристики шлама водоподготовки (СВ) сильно зависят от качества исходной воды, типа используемых химикатов и их дозировки во время очистки, что приводит к значительным колебаниям в зависимости от сезона и типа очистных сооружений. В зависимости от качества исходной воды, используемых методов очистки и продолжительности эксплуатации в течение года, СВ может содержать широкий спектр микроорганизмов, включая ооцисты и цисты простейших, а также патогены, удаляемые в процессе коагуляции и других процессов очистки [5]. Характеристики шлама водоподготовки (ОСВ) существенно зависят от ряда факторов, включая свойства и источник сырой воды, производительность, тип и дозировку применяемых коагулянтов, уровень загрязнения исходной воды и условия эксплуатации очистных сооружений [6]. Химический анализ, проведенный методом рентгеновской дифракции (РФА), показал, что остатки очистных сооружений (ОСВ) преимущественно аморфны и не имеют четко выраженной кристаллической структуры. Тем не менее, минералогические исследования подтвердили наличие различных компонентов в составе WTR, включая кварц, полевой шпат, кальцит, иллит/смектит, фероксигит, альбит и каолинит [7]. Муниципальный ил и твердые биологические отходы, как правило, содержат значительные количества азота и фосфора, которые обеспечивают существенную агрономическую ценность для применения в ландшафтном дизайне, лесном хозяйстве, мелиорации земель и сельском хозяйстве. Состав питательных веществ в твердых биологических отходах

во многом зависит от типа используемых методов обработки ила, технологий очистки, применяемых на муниципальном уровне, и характеристик источников поступления [8].

В связи с быстрым ростом населения мира, образование ила водоочистки (WTS) продолжает увеличиваться, что делает внедрение эффективных стратегий повторного использования и восстановления ила все более важным. Однако варианты утилизации WTS становятся все более ограниченными из-за экологических проблем и экономических ограничений. Важнейшим этапом управления СОС является снижение их влажности, поскольку отсутствие этого процесса делает последующую обработку, транспортировку и утилизацию сложными и непрактичными. Более того, объём и физико-химические свойства шлама существенно влияют на выбор методов обработки, а также на связанные с этим затраты на транспортировку и окончательную утилизацию [2].

Повышение концентрации твёрдых частиц в шламе является основополагающим шагом на пути к уменьшению его общего объёма и обеспечению экономически эффективного управления. Эта цель может быть достигнута путём применения соответствующих процессов очистки. Распространенные подходы к обработке и утилизации шлама включают стяжение, кондиционирование (как химическое, так и физическое), обезвоживание с использованием механических и немеханических методов, снижение содержания твёрдых частиц, рекуперацию ресурсов и варианты окончательной утилизации, такие как захоронение на полигонах [8].

В процессах коагуляции-флокуляции используются различные коагулянты, включая традиционные химические агенты, такие как соли металлов и синтетические полимеры, а также инновационные альтернативы, такие как экологически чистые или «зелёные» коагулянты, полученные из природных материалов. Такой диверсифицированный подход позволяет повысить эффективность очистки воды различного качества и для разных целей [9].

Традиционные неорганические коагулянты, такие как соли железа ($FeCl_2$, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$), квасцы ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) и полиалюминийхлорид (ПАХ), широко применяются в процессах коагуляции-флокуляции. Эти коагулянты способствуют агрегации взвешенных частиц в сырой воде, тем самым облегчая седиментацию. Однако эффективность удаления твердых частиц зависит от ряда факторов, включая концентрацию общего количества взвешенных частиц (ОВВ) в поступающей воде, тип и оптимальную дозировку применяемого коагулянта, а также эффективность стадии седиментации [9].

В обычных отстойниках обычно удаляется 60 – 90% от общего количества твердых веществ, а оставшиеся впоследствии улавливаются фильтрационными установками. Важно отметить, что общее количество взвешенных твердых веществ (TSS) и мутность (выраженная в NTU) не имеют прямой корреляции один к одному; соотношение TSS к NTU обычно находится в диапазоне от 0,5 до 2. В системах коагуляции с использованием алюма количество образующихся твердых веществ варьируется в широких пределах: от 8 до 210 кг на $1000 m^3$ очищенной сырой воды, в зависимости от качества сырой воды и условий эксплуатации [10].

Остатки после очистки питьевой воды включают взвешенные вещества, органические вещества и растворенные ионы, такие как Ca^{2+} , Fe^{2+} и Mn^{2+} . Захоронение этих остатков на свалках представляет собой экологический риск из-за возможного выщелачивания таких химических веществ, как алюминий. Однако эти отходы могут быть повторно использованы в различных целях, в том числе в качестве наполнителей в строительстве, компонентов средств для очистки окружающей среды и коагулянтов в процессах очистки сточных вод [11].

Восстановление коагулянтов из осадка водоподготовки в основном достигается путем кислотного разложения, хотя в качестве альтернативных методов применяются также подщелачивание, ионный обмен и мембранные разделения (рис. 1) [9].



Рис. 1. Процесс утилизации шлама, образующегося при очистке питьевой воды

Было показано, что шлам очистки сточных вод улучшает механические свойства асфальтобетонных смесей при использовании в качестве наполнителя, в частности, повышая стойкость к усталостному растрескиванию и низкотемпературные характеристики регенерированных асфальтобетонных смесей (с 1,5% шлама) [12].

Искусственная нейронная сеть (ИНС) — это метод мягких вычислений, используемый для прогнозирования оптимальной дозировки коагулянта для эффективного процесса очистки сырой воды. Настройка модели ИНС включает в себя ввод параметров качества сырой воды с водоочистной станции Парвати, таких как мутность, pH, температура и щелочность [13].

Коагуляция является неотъемлемой частью процесса очистки питьевой воды. Она используется для агломерации взвешенных твердых частиц в более крупные тела. Химические коагулянты добавляются в воду для облегчения связывания между частицами, что широко используется для улучшения удаления твердых частиц, коллоидных и растворенных веществ. Оптимизация коагуляции для выбора наилучших условий и дозировки коагулянта имеет важное значение. Поскольку чрезмерное передозирование коагулянта приводит к увеличению стоимости очистки и проблемам со здоровьем населения [14].

Искусственная нейронная сеть (ИНС) используется для оценки нелинейных зависимостей между входными и выходными данными в наборе данных. Многослойная ИНС предназначена для прогнозирования параметров качества очищенной воды и оптимальной дозировки коагулянта. Для получения корректной и корректной модели ИНС разработано несколько архитектур с одним скрытым слоем и скрытыми нейронами. Использование ИНС позволяет эффективно устранять неопределенность до подачи воды населению [14]. Кроме того, модели ИНС применялись для оценки качества воды и прогнозирования токсичности аммония, обеспечивая эффективный подход к оптимизации управления сбросом сточных вод.

Результаты продемонстрировали эффективность ИНС с высокой точностью прогнозирования ($R^2 = 0,9686$) при оценке токсического воздействия аммония на водные организмы [15].

Целью данного исследования является изучение физико-химических характеристик как сырой, так и очищенной воды, а также свойств остаточного ила для оценки качества воды и поведения ила на водоочистных сооружениях. Эта оценка проводится с использованием исторических данных в со-

четании с экспериментальным анализом, подкрепленным моделированием на основе искусственных нейронных сетей (ИНС).

Материалы и методы исследования

Водоочистные сооружения в городе Эн-Наджаф

Мухафаза Эн-Наджаф, расположенная в центральном регионе Евфрата Ирака, находится примерно в 180 км к югу от столицы, Багдада. Общая площадь мухафазы составляет около 28 824 км², а ее население оценивается в 1,5 миллиона человек. В данном исследовании основное внимание уделяется поверхностным водам, забираемым из реки Евфрат, называемой местными жителями Шатт-Эль-Куфа, которая является основным источником сырой воды для провинции.

Для обеспечения города питьевой водой в достаточном количестве требуется около 650 000 м³/сутки, что эквивалентно примерно 450 литрам на душу населения в сутки. Установленная (проектная) мощность городских очистных сооружений составляет около 773 000 м³/сутки, тогда как фактическая производительность в настоящее время составляет всего 560 000 м³/сутки. В *таблице 1* приведены производительность и эксплуатационные характеристики основных очистных сооружений, снабжаемых водой непосредственно из реки Евфрат.

Таблица 1

Установленная и фактическая производительность водоочистных сооружений, снабжаемых водой из реки Евфрат (Мухафаза Эн-Наджаф)

Источник	Установленная производительность, м ³ /сут.	Фактическая производительность, м ³ /сут.
Объединенная ВС Эн-Наджафа (Эль-Зерка, осень)	210,000	160,000
Старая Куфа ВС	108,000	80,000
Новая ВС Наджафа-Куфы (основной проект)	285,000	210,000
ВС Эль-Аббасия	60,000	35,000
ВС Эль-Баракия	110,000	75,000
Всего	773,000	560,000

Источник: составлено автором

Район исследования

Район исследования — река Евфрат к востоку от города Эн-Наджаф — расположен между 44°.39'23"036 восточной долготы и 32°.04'90"997 северной широты и 44°.44'49"695 восточной долготы и 31°.98'94"774 северной широты на Месопотамской аллювиальной равнине. Река течёт с севера на юг, как показано на *рис. 2*. Перед входом в провинцию Эн-Наджаф река Евфрат разветвляется на реки Аль-Аббасия и Аль-Куфа. Этот город полностью зависит от реки Аль-Куфа и её притоков для удовлетворения своих потребностей в питьевой воде и орошения сельскохозяйственных угодий. В регионе сухое, знойное лето и холодные зимы из-за засушливого или полузасушливого климата, со среднегодовым количеством осадков около 144,2 мм.



Рис. 2. Места отбора проб через реку Евфрат, город Эн-Наджаф

Водоочистная станция Старой Куфы (ВС Старой Куфы)

ВС Старой Куфы были построены в 1958 году. Они забирают сырую воду из реки Шатт-эль-Куфа. Мощность станции была рассчитана на $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Однако в настоящее время она работает с производительностью $4500 \text{ м}^3/\text{ч}$. ВС Старой Куфы, будучи традиционным типом, включает в себя ту же линию очистки, что и Объединенные ВС Наджафа. Характеристики очистных сооружений, касающихся процессов удаления мутности, представлены в *таблице 2*. Поскольку станция является одним из старейших водоочистных сооружений в городе Наджаф, она была построена во времена монархии и не претерпела никаких попыток развития промышленности. Высокий расход воды — обычное явление в этих регионах, особенно в дневное время из-за высокой плотности населения. Это создает значительный дефицит и поднимает важные вопросы о возможности обеспечения этих районов достаточным количеством питьевой воды. Водозабор расположен в шести метрах ниже по течению реки Евфрат. Резиновая решётка защищает водозабор от плавающего мусора и водорослей. Насосная станция состоит из трёх насосов: два из них используются, а третий находится в резерве. Максимальная производительность насосов, работающих летом, и высокий дневной расход воды обеспечивают работу резервных насосов в дополнение к основным для покрытия растущего потребления в этот период. Каждый насос имеет общую производительность $700 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напор 45 м . Бассейн быстрого смещивания предназначен для приёма воды, поднимаемой из реки этими насосами. Для управления объёмом забираемой из реки воды рядом со станцией водоподъёма расположена хорошо организованная система.

Таблица 2

Характеристики очистных сооружений на водопроводной станции Старой Куфы

Очистное сооружение	Тип	Количество резервуаров	Размеры каждого резервуара	Оборудование
Мгновенное смещивание	Прямоугольные бетонные резервуары	2	Длина = 5,5 м Ширина = 2,75 м Глубина боковой воды = 5 м	Каждый резервуар оснащен мешалкой мощностью 7 кВт
Кларифлокуляция	Круглые бетонные резервуары	2	Наружный диаметр = 35 м Внутренний диаметр = 10 м Глубина боковой воды = 4 м	Каждый флокулятор оснащен мешалкой мощностью 4 кВт
Гравитационная фильтрация	Прямоугольные гравитационные песчаные фильтры	10	9.25 × 9.30 м ²	Установка оснащена двумя насосами обратной промывки (1W + 1S), производительностью 3600 м ³ /ч каждый

Источник: составлено автором

Процесс очистки

На водоочистной станции Старой Куфы используется традиционная система очистки, в которой сырья вода из рукава Евфрата Шатт-эль-Куфа проходит входную фильтрацию, мгновенное смещивание с алюминием, кларифлокуляцию, фильтрацию через песчаные фильтры и окончательное хлорирование перед распределением. Хотя эта последовательность действий предназначена для снижения мутности и содержания взвешенных веществ, станция часто работает с превышением своей первоначальной проектной мощности, что снижает эффективность осветления и фильтрации. Мониторинг показал, что мутность очищенной воды иногда превышает иракские стандарты. Еще одной эксплуатационной проблемой является накопление остаточного ила в бассейнах кларифлокуляции, образованного осевшими глиной, илом, органическими веществами и остатками коагулянта. Высокая мутность воды в Евфрата увеличивает образование ила, а недостаточный забор воды может привести к его повторному образованию, сокращению времени задержки и снижению эффективности очистки. В этом шламе обычно наблюдается высокий уровень взвешенных веществ и ХПК, что подчеркивает необходимость систематического управления шламом для поддержания производительности установки и обеспечения бесперебойной подачи питьевой воды.

Отбор проб

Данные, использованные в данном исследовании для анализа характеристик ила, были получены из Управления водных ресурсов Эн-Наджафа и охватывают период с 1 июня по 15 ноября 2024 года. Образцы ила отбирались из отстойников и во время обратной промывки фильтров с использованием стерильных 5-литровых пластиковых контейнеров. Образцы гомогенизировались, и аликовты отбирались в соответствии с конкретными требованиями каждого теста. Сразу после отбора пробы анализиро-

вались на содержание тяжелых металлов, а также на их химические и физические свойства. Измерения регистрировались каждые две недели и сравнивались с соответствующими нормативами Ирака.

Для оценки качества ила и его потенциального воздействия на окружающую среду был выбран набор из одиннадцати параметров качества воды и одиннадцати тяжелых металлов с учетом доступности данных и экологической значимости. Параметры включали температуру, общее содержание взвешенных веществ (ОВВ), pH, химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода (БПК), фторид (F^-), хлорид (Cl^-), сульфат (SO_4^{2-}), нитрат (NO_3^-), фосфат (PO_4^{3-}), аммоний (NH_4^+), свинец (Pb), мышьяк (As), медь (Cu), никель (Ni), селен (Se), кадмий (Cd), цинк (Zn), хром (Cr), кобальт (Co), железо (Fe) и марганец (Mn). Отбор проб и анализы проводились в соответствии со Стандартными методами исследования воды и сточных вод [16].

Кроме того, данные о качестве сырой и очищенной воды для водопроводной станции Старой Куфы были получены из Управления водных ресурсов Наджафа за период 2020 – 2024 годов. Для каждого параметра были собраны среднемесячные значения, что позволило сформировать набор данных за пять лет, охватывающий как сырую воду из реки Евфрат до очистки, так и очищенную питьевую воду после очистки.

Модель искусственной нейронной сети (МИНС)

Модель искусственной нейронной сети (ANN) была применена для оценки влияния выбранных параметров ила, включая хлориды (Cl^-), pH, температуру, нитраты (NO_3^-), аммоний (NH_4^+), биохимическое потребление кислорода (БПК), химическое потребление кислорода (ХПК), фосфаты (PO_4^{3-}), фториды (F^-) и сульфаты (SO_4^{2-}), на концентрацию общего количества взвешенных веществ (ОВВ). Модель была разработана в ходе серии обучающих, тестовых и контрольных испытаний. В первом случае было отобрано 11 экспериментальных образцов, которые случайным образом были разделены на три группы: семь для обучения, две для тестирования и одна для контрольной. Во втором случае были использованы 19 выборок, которые были распределены на 13 обучающих, четыре тестовых и два контрольных подмножества. Данные были перескелонированы с помощью стандартизации, а архитектура сети включала три скрытых слоя. ИНС использовалась для выявления математической связи между независимыми входными переменными и зависимыми выходными переменными (концентрацией TSS). Эффективность модели оценивалась с помощью коэффициента детерминации (R^2), который количественно определял сходство между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями и подтверждал силу установленных корреляций [17].

Результаты и обсуждения

Качество сырой и очищенной воды

Различить мутность и общее содержание взвешенных частиц (ОВВ) непросто, поскольку эти два термина часто используются взаимозаменяющими. Мутность описывает степень рассеивания и поглощения света взвешенными частицами, в то время как ОВВ является прямым показателем концентрации твердых частиц в воде. Хотя эти два параметра коррелируют, на их взаимосвязь влияют такие факторы, как размер, форма частиц и оптические свойства [18].

Анализ данных за период с 2021 по 2025 год показывает, что средние концентрации ОВВ в очищенной воде водопроводной станции Старой Куфы можно надежно оценить по значениям мутности (рис. 4). Это наблюдение согласуется с выводами Абеда и Худаира [19], которые сообщили о сильной корреляции ($R^2 = 0,812$) между мутностью и ОВВ в распределительной сети Аль-Сарай в Куфе. Однако

важно отметить, что эта корреляция не является абсолютной [10]. В [10] подчеркивается, что соотношение TSS к мутности может широко варьироваться, как правило, от 0,5 до 2, в зависимости от характеристик сырой воды и условий эксплуатации.

В настоящем исследовании мутность сырой воды, поступающей на водопроводные системы Старой Куфы, значительно колебалась: значения составляли приблизительно 750 NTU в мае и 35 NTU в августе (рис. 4). Несмотря на это различие, мутность очищенной воды оставалась относительно стабильной, около 5 NTU в мае и 4,8 NTU в августе (рис. 3). Такое поведение свидетельствует о том, что, хотя процессы очистки в целом эффективны в снижении мутности, накопление и последующее повторное взвешивание твердых частиц, особенно в условиях колебаний суточного потребления, может ухудшить качество сточных вод, если не проводить регулярную очистку [19].

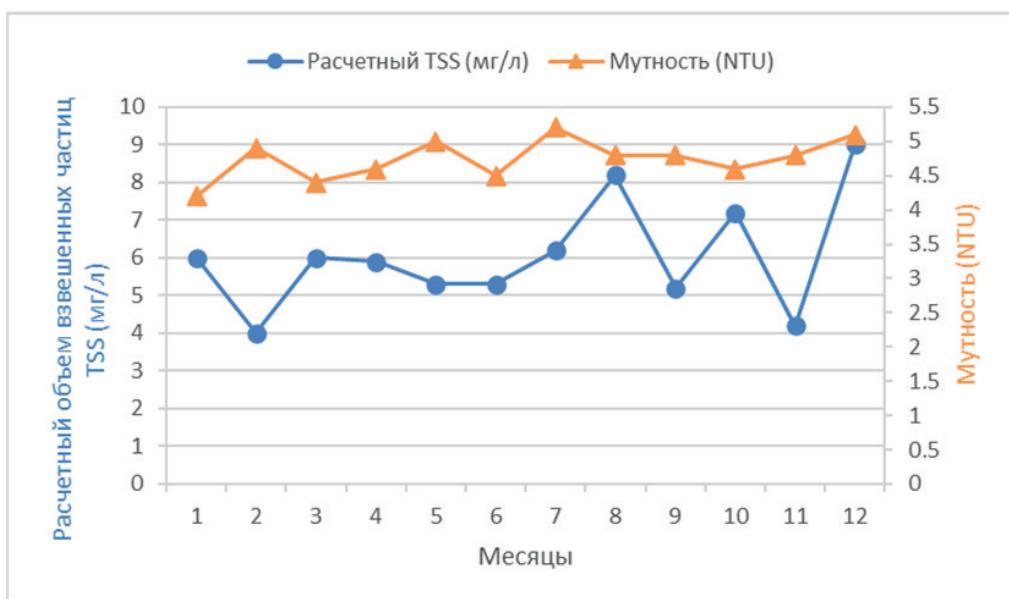


Рис. 3. Среднемесячная мутность и соответствующие расчетные значения (ОВВ) в очищенной воде

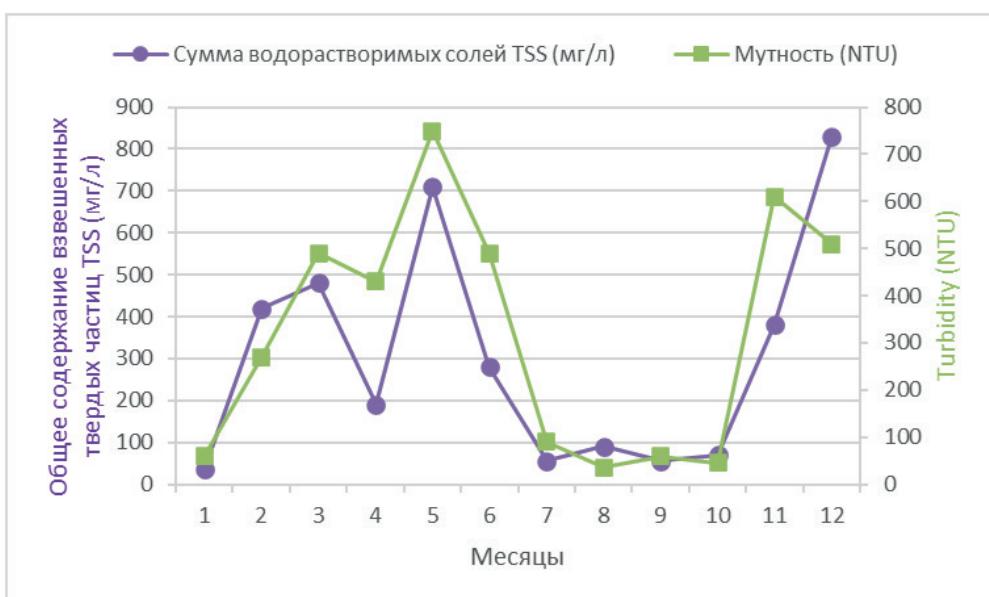


Рис. 4. Среднемесячные значения мутности и взвешенных веществ в сырой воде

Эти результаты подчеркивают, что как мутность, так и TSS вносят значительный вклад в образование остаточного ила на водопроводных системах Старой Куфы. Поскольку образование ила напрямую связано с массой взвешенных частиц, удаляемых в процессе очистки, корреляция между мутностью и содержанием взвешенных частиц может быть использована в качестве инструмента прогнозирования для оценки выхода ила [20]. Понимание этих взаимосвязей крайне важно для оптимизации стратегий управления илами и обеспечения постоянного соответствия стандартам качества питьевой воды.

Качество остаточного ила

Физико-химические свойства остаточного ила оценивались по таким ключевым параметрам, как общее количество взвешенных веществ (TSS), pH, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , ХПК, БПК и температура. Документально подтверждено, что установки коагуляции с использованием алюмовых квасцов способны производить от 8 до 210 кг общего количества твердых веществ на 1000 м³ очищенной сырой воды [10]. Анализ данных, собранных в период с 2020 по 2024 год, показал, что максимальный выход ила достигал 278,6 кг/1000 м³, что превышает указанный диапазон. Это увеличение объясняется сокращением сброса из реки Евфрат, что привело к повышению концентрации ила и других органических и неорганических компонентов. Однако средний выход ила составил 96,65 кг/1000 м³, что находится в пределах типичного диапазона, указанного в литературе [10]. Проектные расчеты за тот же период показали, что максимальный объем взвешенных веществ в осадке, образующемся в результате осаждения и фильтрации на водопроводной станции Старой Куфы, составил приблизительно 605 м³/сут. В период с 1 июня по 1 ноября 2024 года максимальный объем взвешенных веществ значительно увеличился, достигнув примерно 1420 м³/сут, как показано на *рис. 5*. Этот пик пришелся на ноябрь и был связан с увеличением расхода воды в реке, содержащей повышенное количество ила и взвешенных веществ, что, в свою очередь, увеличило мутность сырой воды.

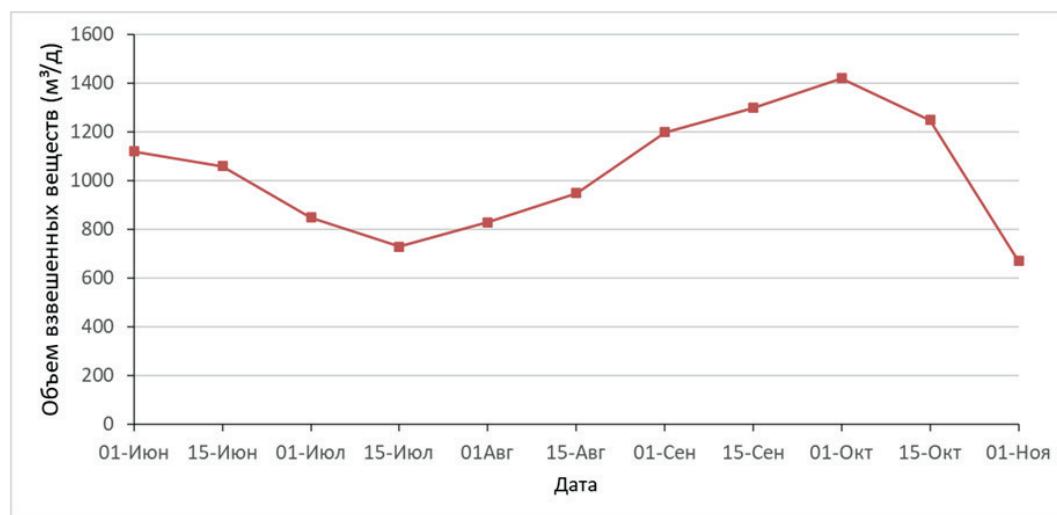


Рис. 5. Объем взвешенных веществ в иле в фиксированные даты

В течение периода исследования концентрации ХПК превышали установленные в Ираке нормативные значения (*рис. 6*). Это может быть объяснено отсутствием легкоразлагаемых органических веществ, необходимых для поддержания анаэробной активности, а также практикой длительного нако-

пления осадка в отстойниках перед его удалением. Такие условия могут способствовать образованию аэробного гранулированного ила (АГС), который характеризуется компактной структурой и устойчивостью к химическому воздействию. Важно отметить, что АГС рассматривается как перспективная среда для очистки соленых сточных вод в условиях различной солености [21].

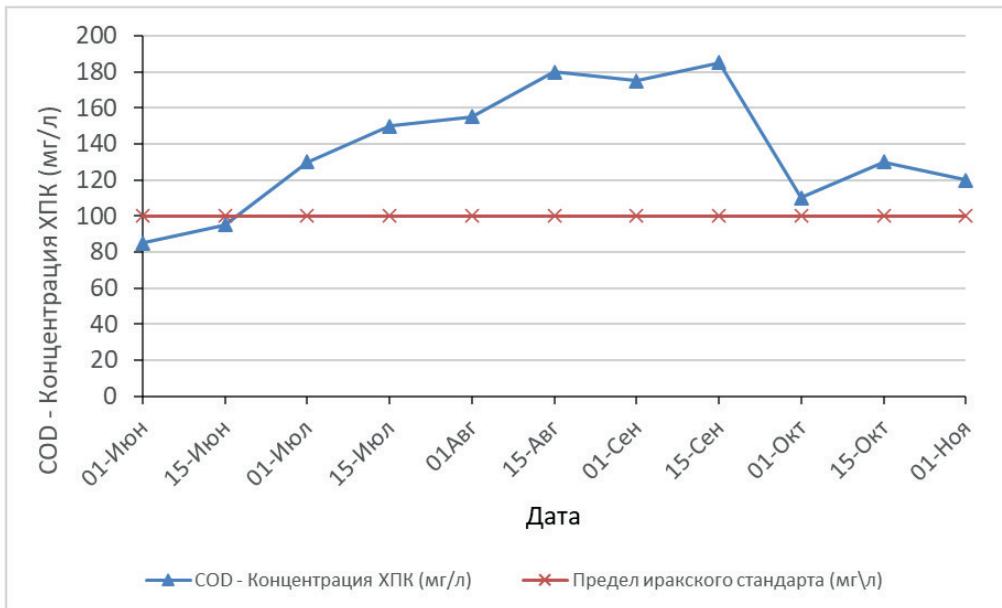


Рис. 6. Концентрация ХПК в иле в фиксированные даты

Как показано на *рис. 7*, температура воды неуклонно снижалась в течение периода исследования, что отражало наступление зимы. Это сезонное охлаждение привело к снижению как испарения, так и скорости выпадения осадков, что повлияло на процесс сушки шлама [10]. Напротив, на *рис. 8* показано, что колебания концентраций других параметров в образцах шлама оставались умеренными и в целом находились в пределах допустимых для Ирака значений в течение всего периода исследования.

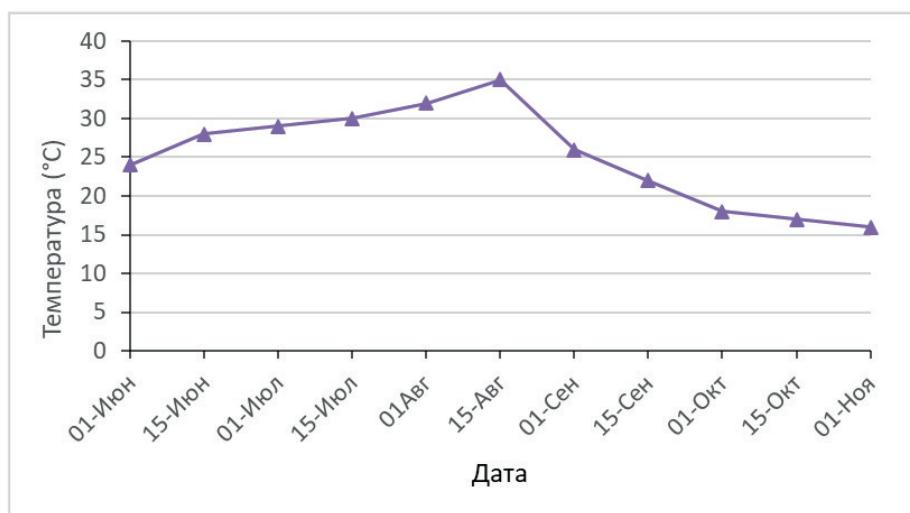


Рис. 7. Температура шлама в фиксированные даты

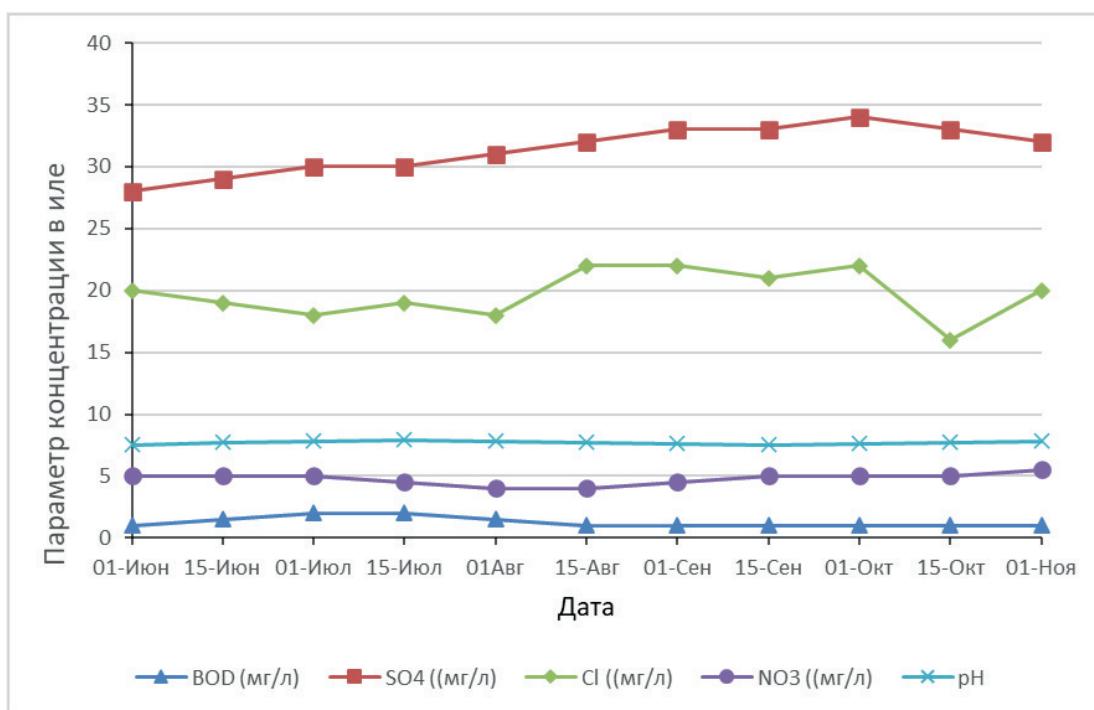


Рис. 8. Концентрации параметров воды в иле в фиксированные даты

Искусственная нейронная сеть (ИНС)

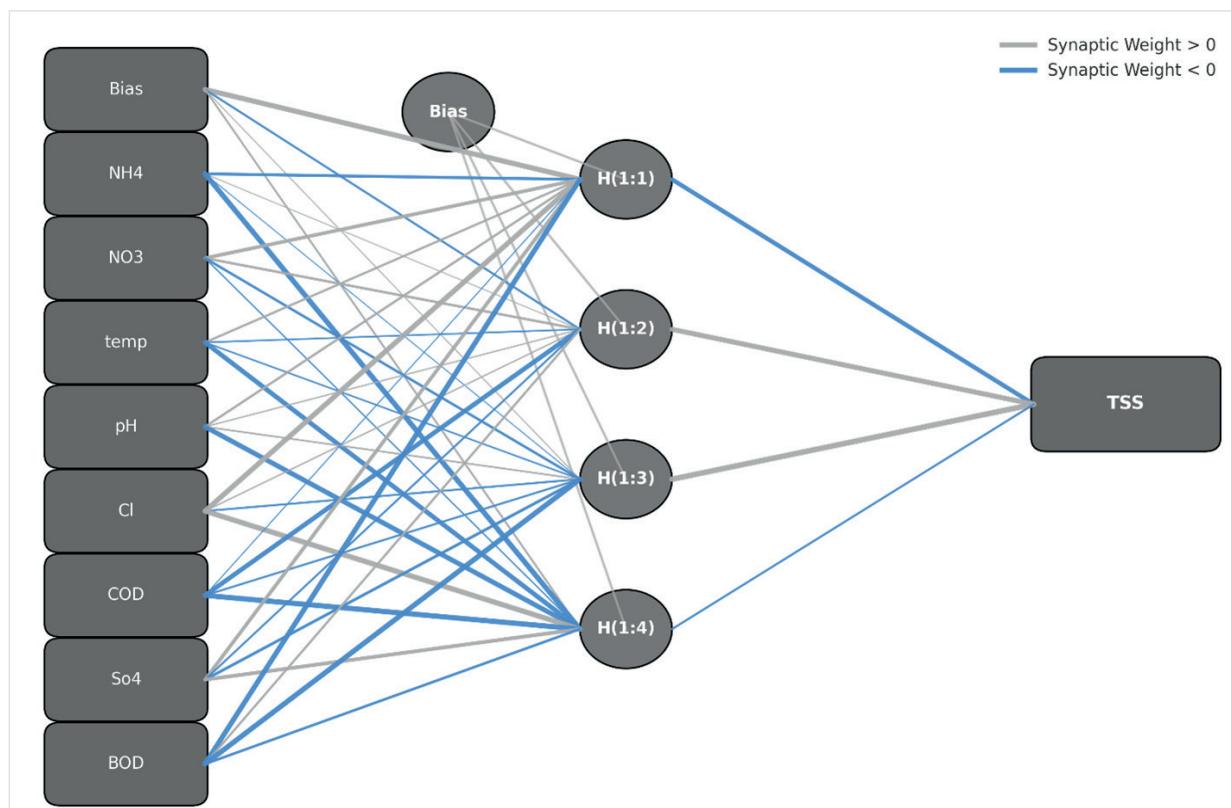


Рис. 9. Схематическое изображение модели ИНС с входными и выходными слоями (Synaptic Weight — Синаптический вес)

Была разработана модель искусственной нейронной сети (ИНС) для прогнозирования зависимой переменной TSS с использованием набора измеренных входных параметров, как показано на *рис. 9*. Связь между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями TSS продемонстрировала сильную линейную корреляцию, достигая высокого коэффициента детерминации ($R^2 = 0,991$), что указывает на превосходную точность прогнозирования модели (*рис. 10*).

Влияние каждой независимой переменной на прогнозируемое значение TSS оценивалось на основе ее относительной значимости в рамках ИНС, следуя подходу, описанному в [22]. Среди протестированных параметров хлорид-ион (Cl^-) оказывал наиболее значительное влияние на результаты модели как на этапе обучения, так и на этапе тестирования. Этот вывод согласуется с результатами, полученными ранее [23], где также было отмечено сильное влияние концентрации хлорида на поведение взвешенных частиц в системах очистки воды (*рис. 11 и 12*).

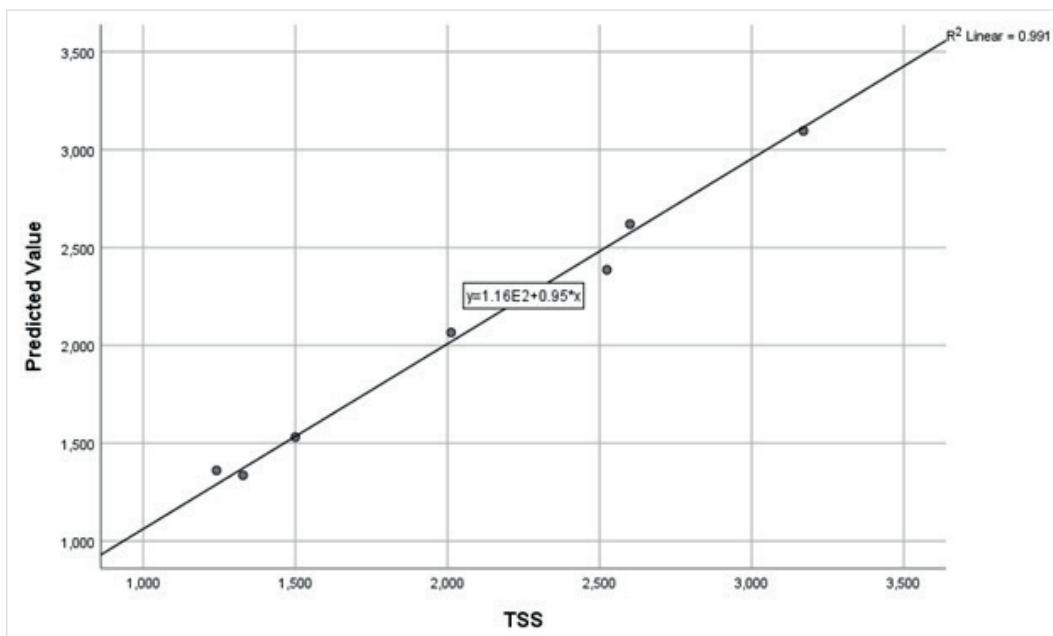


Рис. 10. Наблюдаемые и прогнозируемые значения TSS для первой модели (Predicted Value—Прогнозируемое значение, TSS—Общее содержание взвешенных твердых частиц)

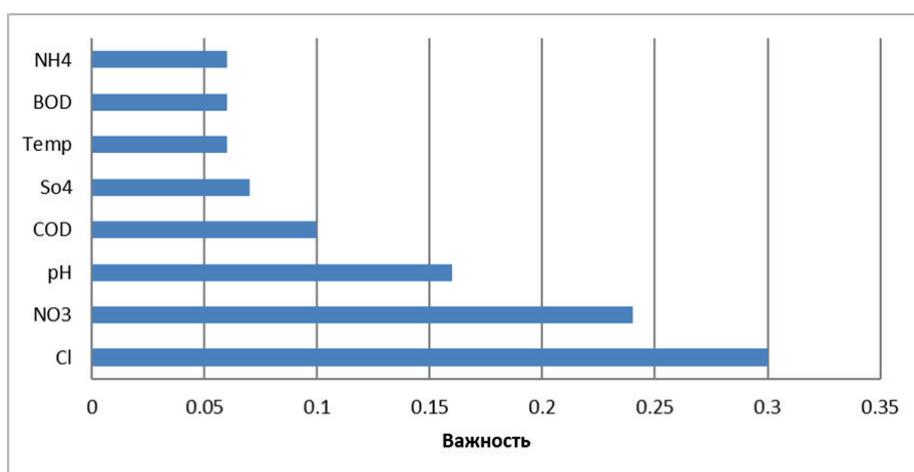


Рис. 11. Значимость параметров воды, влияющих на TSS

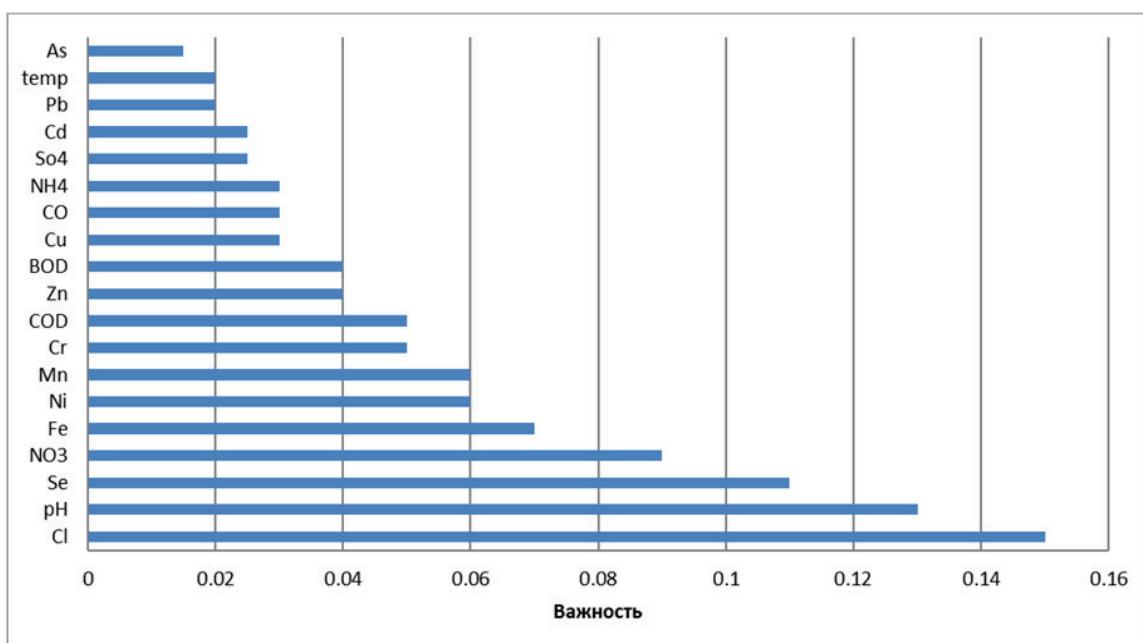


Рис. 12. Значимость параметров воды и тяжелых металлов, влияющих на общее содержание взвешенных частиц

Заключение

Оценка остаточного ила и качества воды является неотъемлемой частью общей оценки эффективности работы водоочистных сооружений, поскольку она отражает как экологические аспекты, так и аспекты общественного здравоохранения. Результаты данного исследования показывают, что мутность и общее содержание взвешенных веществ (ОВВ) являются основными факторами, влияющими на образование ила на водоочистных сооружениях Старой Куфы (ВОС). Максимальное количество образовавшегося ила достигло 278,6 кг/1000 м³, что превышает установленный предел из-за снижения стока реки Евфрат, что привело к повышению концентрации взвешенных веществ, органических веществ и других материалов.

Анализ образцов ила также показал, что максимальный объем ОВВ в илах, образовавшихся в период с 1 июня по 1 ноября 2024 года, составил приблизительно 1420 м³/сут. Кроме того, значения химического потребления кислорода (ХПК) превышали установленные в Ираке нормативные значения в течение исследуемого периода, что указывает на потенциальные экологические риски, связанные с ненадлежащим обращением с илами. Для достижения более устойчивого подхода дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку технических рекомендаций по повторному использованию, переработке и восстановлению шлама водоподготовки (ОСВ) в промышленных и экологических целях. Кроме того, рекомендуется провести дополнительные исследования для оценки воздействия остаточного шлама с повышенным уровнем ХПК на окружающую среду в целях поддержки устойчивых методов управления и защиты водных ресурсов.

Библиографический список

1. World Health Organization, Guidelines for drinking-water quality: first addendum to the fourth edition. 2017.

2. *T. Ahmad, K. Ahmad, and M. Alam*, "Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options", *Procedia Environ Sci*, vol. 35, pp. 950 – 955, 2016, doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.088.
3. *M. D. Nguyen, M. Thomas, A. Surapaneni, E. M. Moon, and N. A. Milne*, "Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy", Nov. 01, 2022, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.eti.2022.102651.
4. *Nelson Belzile and Yu-Wei Chen*, "Re-utilization of drinking water treatment residuals (DWTR): a review focused on the adsorption of inorganic and organic contaminants in wastewater and soil", *Environ Sci (Camb)*, no. 5, pp. 997 – 1296, May 2024.
5. *L. Pérez, I. Escudero, A. G. Cabado, B. Molinero-Abad, and M. J. Arcos-Martínez*, "Study of ceramic membrane behavior for okadaic acid and heavy-metal determination in filtered seawater", *J Environ Manage*, vol. 232, pp. 564 – 573, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.11.077.
6. *M. S. E. Abdo, K. T. Ewida, and Y. M. Youssef*, "Recovery of alum from wasted sludge produced from water treatment plants", *Journal of Environmental Science and Health*, vol. 28, no. 6, pp. 1205 – 1216, 2008.
7. *Tarique Ahmad, Kafeel Ahmad, and Mehtab Alam*, "Characterization and constructive utilization of sludge produced in clari-flocculation unit of water treatment plant", *IPO SCIENCE*, vol. 5, no. 3, Mar. 2018.
8. *D. Fytilli and A. Zabaniotou*, "Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 116 – 140, Aug. 2008.
9. *M. K. Karnena and V. Saritha*, "Contemplations and investigations on green coagulants in treatment of surface water: a critical review", Jul. 01, 2022, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi: 10.1007/s13201-022-01670-y.
10. R. Q. Syed and M. M. Edward, *Wastewater treatment plants: Planning, Design and Operation*. New York, 1999.
11. *Pumipat K. Pachana, Ubolluk Rattanasak, Kamchai Nuithitikul, Peerapong Jitsangiam, and Prinya Chindaprasirt*, "Sustainable utilization of water treatment residue as a porous geopolymer for iron and manganese removals from groundwater", *J Environ Manage*, vol. 302, Jan. 2022.
12. *Robeam S. Melaku and Daba S. Gedafa*, "Impact of Wastewater Treatment Sludge on Cracking Resistance of Hot Mix Asphalt Mixes at Lower Mixing Temperature", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 32, no. 12, Dec. 2020.
13. *A. S. Kote and D. V Wadkar*, "Modeling of Chlorine and Coagulant Dose in a Water Treatment Plant by Artificial Neural Networks", 2019. [Online]. Available: www.etasr.com.
14. *A. B. Sengul and Z. Gormez*, "Prediction of Optimal Coagulant Dosage in Drinking Water Treatment by Artificial Neural Network", in *Improving Efficiency of Water Systems in a Changing natural and financial Environment*, Kocaeli, Turkey , Apr. 2013, pp. 11 – 13.
15. *M. Solaimany, A. Aminabad, A. Maleki, and M. Hadi*, "Application of artificial neural network (ANN) for the prediction of water treatment plant influent characteristics Introduction 1", 2013. [Online]. Available: <http://jaehr.muk.ac.ir>.
16. American Public Health Association and American Water Works Association; Water Environment, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd ed. Washington, D. C: APHA/AWWA/WEF, 2012.
17. IBM Software Group, *IBM SPSS Neural Networks 20, Guide*. Armonk, NY, USA: IBM Corporation, 2011.

18. *M. Serajuddin, M. A. I. Chowdhury, M. M. Haque, and M. E. Haque*, “Using Turbidity to Determine Total Suspended Solids in an Urban Stream: A Case Study”, International Journal of Engineering Trends and Technology, vol. 67, no. 9, pp. 83 – 88, Sep. 2019, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V67I9P214.

19. *Z. H. Abed and K. M. Khudair*, “MODELING OF TURBIDITY DISTRIBUTION IN WATER NETWORKS USING PMS MODEL-AL-SARAY SECTOR IN KUFA CITY AS A CASE STUDY”, Kufa Journal of Engineering, vol. 14, no. 3, pp. 48 – 68, Jul. 2023, doi: 10.30572/2018/KJE/140304.

20. *J. C. Crittenden, R. R. Trussell, D. W. Hand, K. J. Howe, and G. Tchobanoglou*, MWH’s Water Treatment: Principles and Design, 3rd ed. Oboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2012.

21. *G. Farooq Jumaah*, “Impact of saline wastewater on the behaviour of aerobic granular sludge (AGS)”, Dijlah Journal of Engineering Science (DJES), vol. 2, no. 3, pp. 248 – 257, 2025.

22. *Yu-chen Wu and Jun-wen Feng*, “Development and Application of Artificial Neural Network”, Wireless Personal Communications, vol. 102, pp. 1645 – 1656, Dec. 2017.

23. *R. Mohammed and B. Al-Obaidi*, “Treatability influence of municipal sewage effluent on surface water quality assessment based on Nemerow pollution index using an artificial neural network”, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing Ltd, Nov. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/877/1/012008.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF WATER QUALITY AND SLUDGE CHARACTERISTICS AT THE OLD KUFA WATER TREATMENT PLANT USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODELING

H. M. J. Alshukri^{*/}**

N. S. Tsarev^{*}

^{*} Ural Federal University, Yekaterinburg

^{**} University of Kufa, An-Najaf

Abstract

This study delivers an integrated assessment of water quality and residual sludge characteristics at the Old Kufa drinking-water facility in Iraq. The analysis targets the full treatment train of the municipal plant together with the generated water-treatment residuals. Operational records from 2020 – 2024 and laboratory measurements collected between June and November 2024 were used to trace the behavior of key indicators – turbidity, total suspended solids, and chemical oxygen demand. We further examine how fluctuations in Euphrates source-water quality and coagulation-flocculation settings condition the specific sludge yield. Measured values are benchmarked against current Iraqi drinking-water and environmental standards, and the operational implications for sustainable sludge management are outlined, in-

The Keywords

Euphrates River; turbidity; drinking water treatment; artificial neural networks; TSS; COD; Al-Najaf; Old Kufa Water Treatment Plant; water treatment residuals.

Date of receipt in edition

20.11.2025

Date of acceptance for printing

29.11.2025

cluding exceedance risk appraisal, reagent-dose optimization planning, and avenues for reuse and resource recovery. The modeling component employs an artificial neural network with inputs pH, Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , and temperature, and targets defined as suspended solids and specific sludge production; the model attains high predictive accuracy ($R^2 = 0.991$). The novelty lies in coupling field and experimental evidence from an urban WTP with ANN-based forecasting of treated-water indicators and sludge generation under variable river inflow. The outcome is a practical decision-support tool enabling sensitivity analysis to influent attributes and dosing strategies. Turbidity and suspended solids emerge as the dominant determinants of sludge formation; a peak specific yield of 278.6 kg /1,000 m³ was observed, motivating adjustments to chemical conditioning and proactive sludge-handling plans. COD exceedances above the 100 mg/L limit indicate environmental risk and the need to reinforce operational resilience through optimized dosing and development of reuse/recovery pathways.

Ссылка для цитирования:

Х. М. Д. Алшукри, Н. С. Царев. Комплексная оценка качества воды и характеристик шлама на водоочистной станции Старой Куфы с использованием моделирования на основе искусственных нейронных сетей. — Системные технологии. — 2025. — № 4 (57). — С. 59–75.