



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<sup>\*/\*\*</sup>

Н. С. Царев<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург

<sup>\*\*</sup> 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<sup>−</sup>, NO<sub>3</sub><sup>−</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 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 м<sup>3</sup>, 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 сырая вода должна проходить 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 процессе 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 осадки 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 осадками 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 жидкие, 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 осадки 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, полевошпат, кальцит, иллит/сметит, ферроксигит, 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. Распространённые подходы к обработке и утилизации шлама включают сгущение, 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].

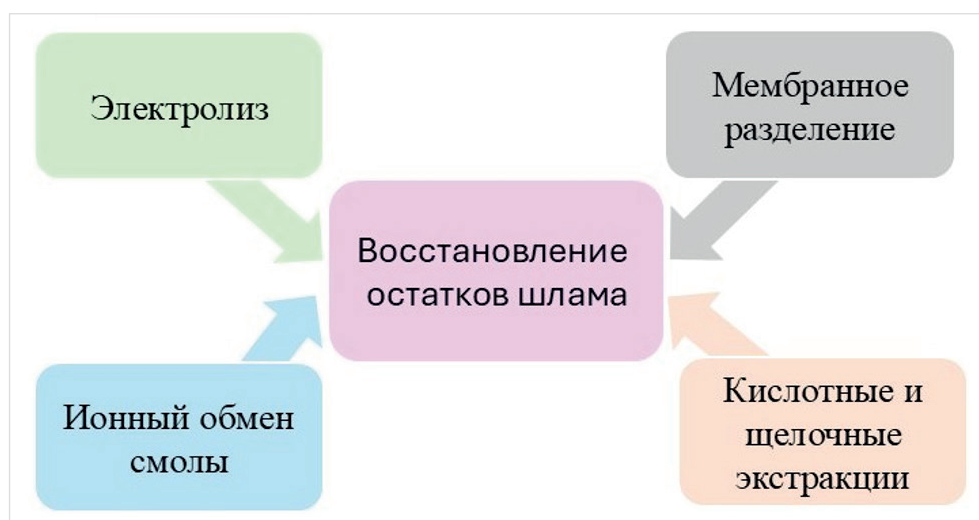
В процессах коагуляции-флокуляции используются различные коагулянты, включая традиционные химические агенты, такие как соли металлов и синтетические полимеры, а также инновационные альтернативы, такие как экологически чистые или «зелёные» коагулянты, полученные из природных материалов. Такой диверсифицированный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

Традиционные неорганические коагулянты, такие как соли железа ( $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), квасцы ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) 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 м<sup>3</sup> 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  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$ . 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 мембранное разделение (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 водоочистой 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 км<sup>2</sup>, 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 м<sup>3</sup>/сутки, что эквивалентно примерно 450 литрам на душу населения в сутки. Установленная (проектная) мощность городских очистных сооружений составляет около 773 000 м<sup>3</sup>/сутки, тогда как фактическая производительность в настоящее время составляет всего 560 000 м<sup>3</sup>/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 <sup>3</sup> /сут.	Фактическая производительность, м <sup>3</sup> /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 полусушливого 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  $45 \text{ м}^3$ . Бассейн быстрого смешивания 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 смешивание	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 m <sup>2</sup>	Установка оснащена двумя насосами обратной промывки (1W + 1S), производительностью 3600 м <sup>3</sup> /ч каждый

Источник: составлено автором

Процесс очистки

На водоочистой станции Старой Куфы используется традиционная система очистки, в которой сырая вода из рукава Евфрата Шатт-эль-Куфа проходит входную фильтрацию, мгновенное смешивание с алюмом, 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 Евфрате увеличивает образование ила, а недостаточный забор воды может привести к его повторному образованию, сокращению времени задержки и снижению эффективности очистки. В этом шламe 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 аликвоты отбирались в соответствии с конкретными требованиями каждого теста. Сразу после отбора пробы анализируются

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 перемасштабированы 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 взаимозаменяемо. 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].

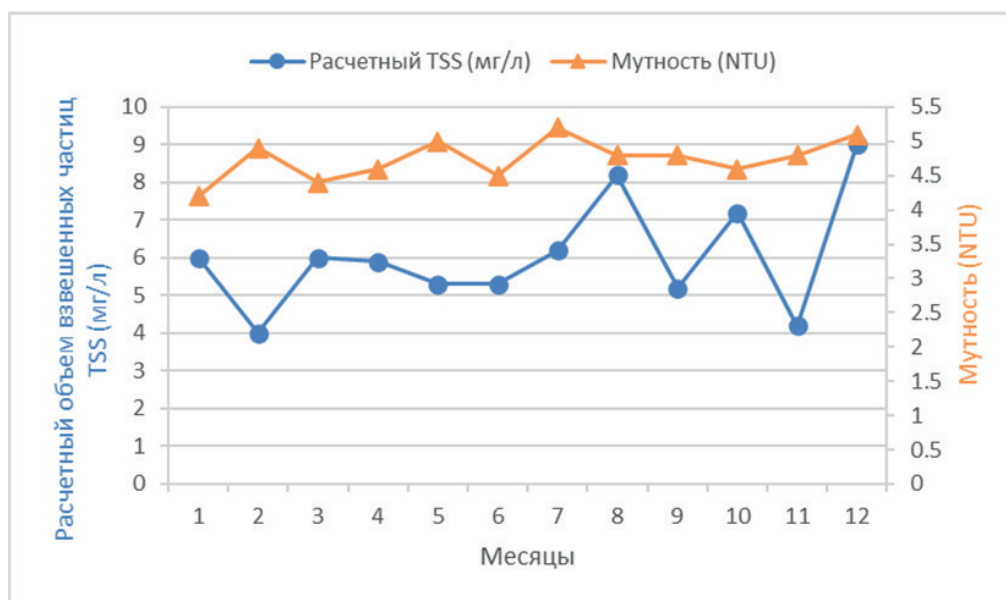


Рис. 3. Среднемесячная мутность и соответствующие расчетные значения (ОВВ) в очищенной воде

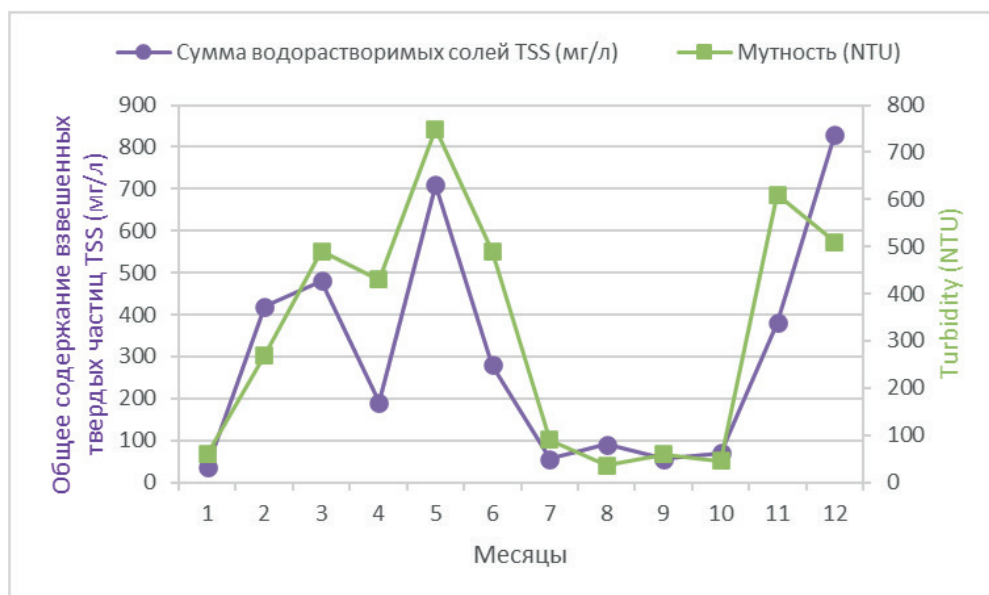
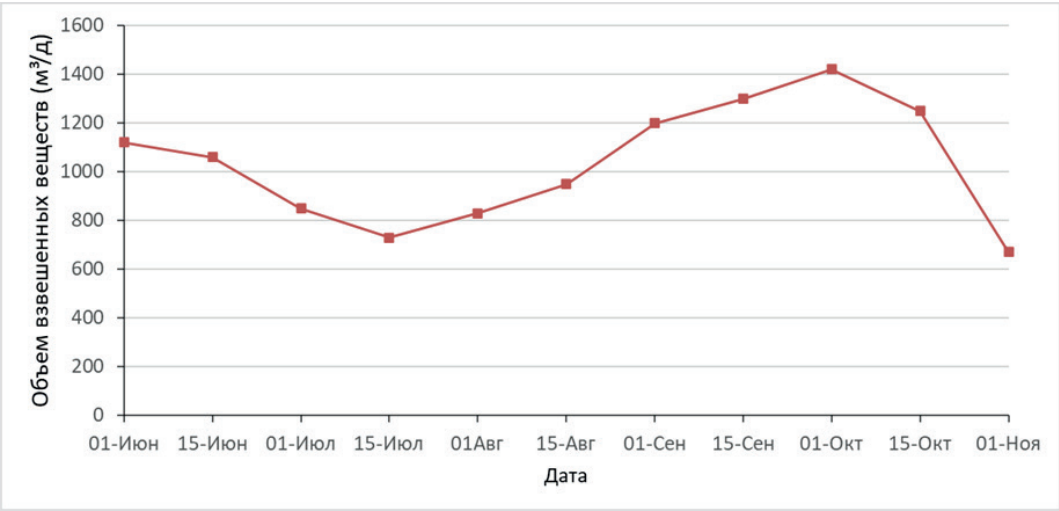


Рис. 4. Среднемесячные значения мутности и взвешенных веществ в сырой воде

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 алюмо-квасцов способны производить от 8 до 210 кг общего количества твердых веществ на 1000 м<sup>3</sup> очищенной сырой воды [10]. Анализ данных, собранных в период с 2020 по 2024 год, показал, что максимальный выход ила достигал 278,6 кг/1000 м<sup>3</sup>, 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 м<sup>3</sup>, 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 м<sup>3</sup>/сут. В период с 1 июня по 1 ноября 2024 года максимальный объем взвешенных веществ значительно увеличился, достигнув примерно 1420 м<sup>3</sup>/сут, как показано на **рис. 5**. Этот пик пришелся на ноябрь и был связан с увеличением расхода воды в реке, содержавшей 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 солёности [21].

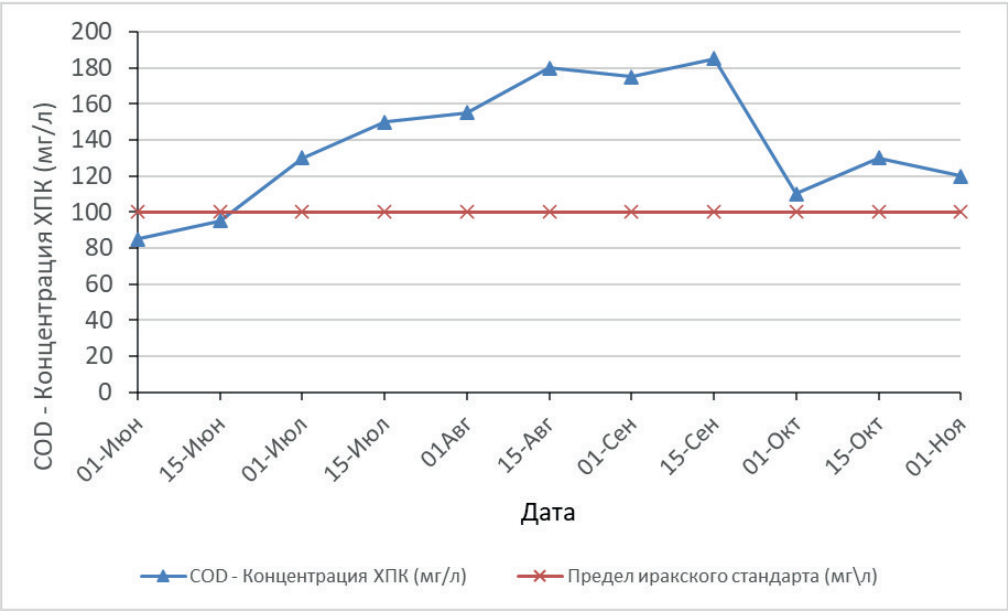


Рис. 6. Концентрация ХПК в иле в фиксированные даты

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.

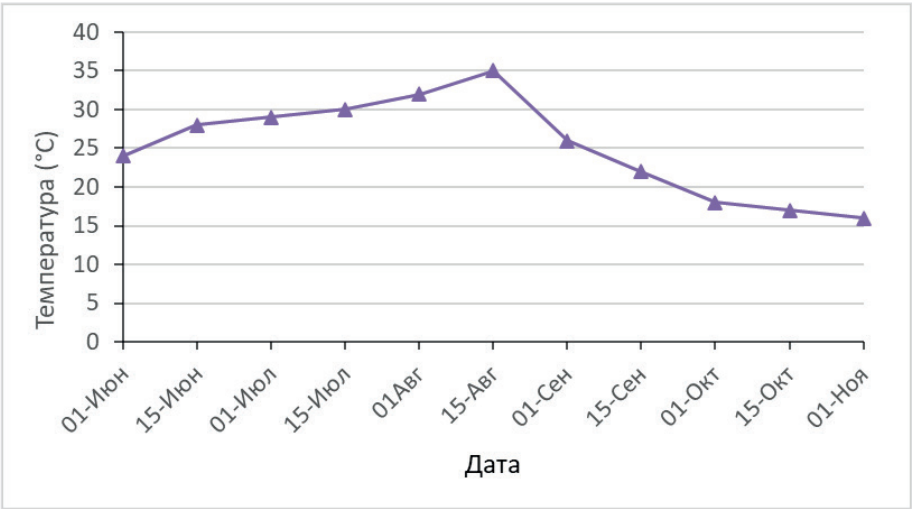


Рис. 7. Температура шлама в фиксированные даты

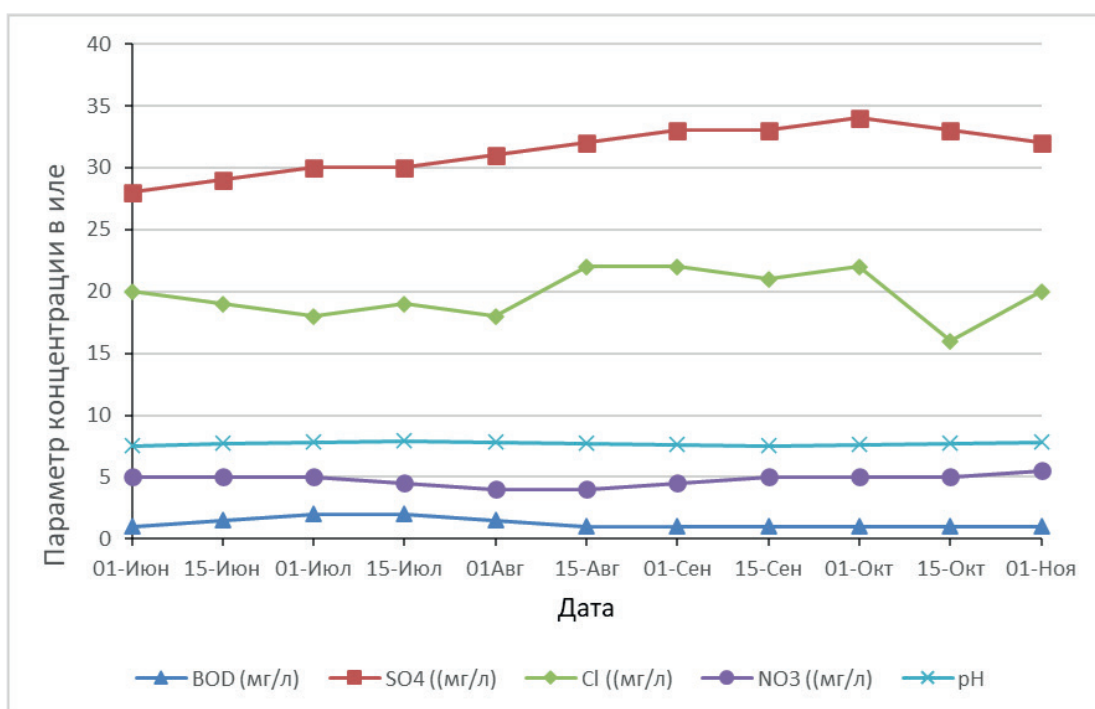


Рис. 8. Концентрации параметров воды в иле в фиксированные даты

### Искусственная нейронная сеть (ИНС)

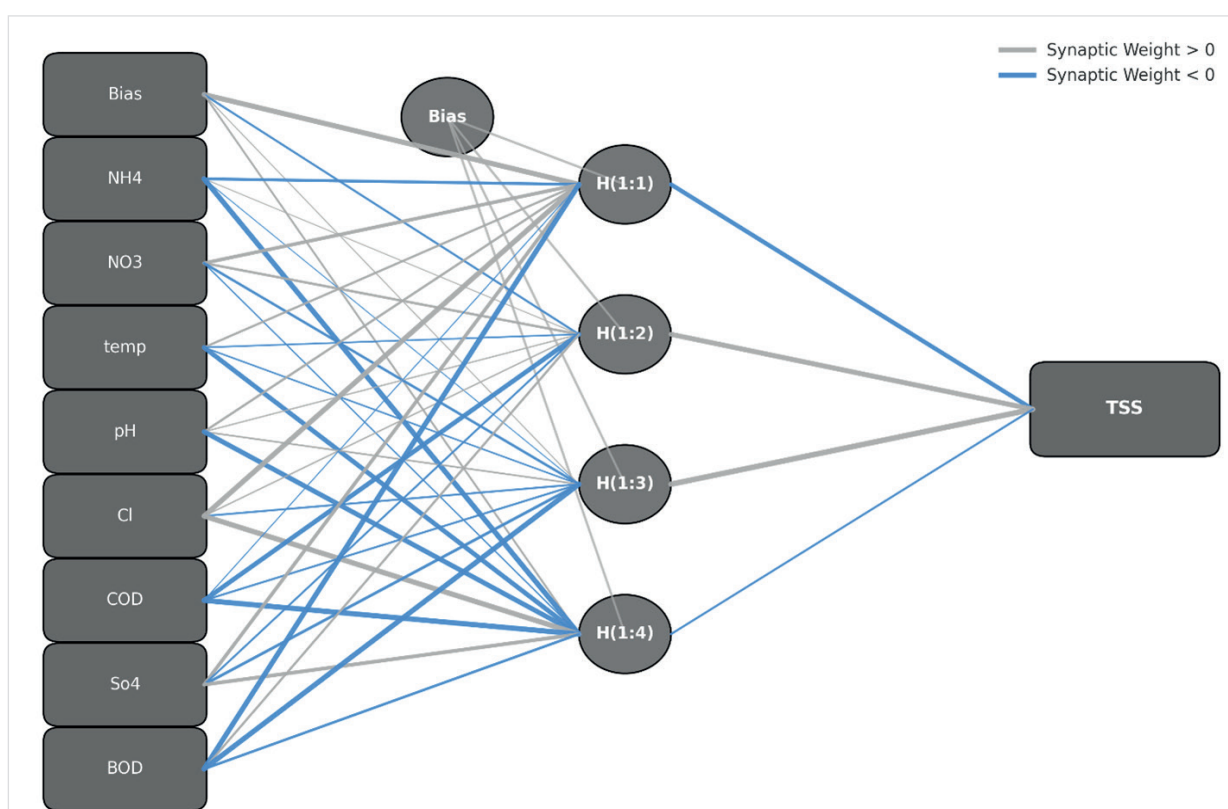
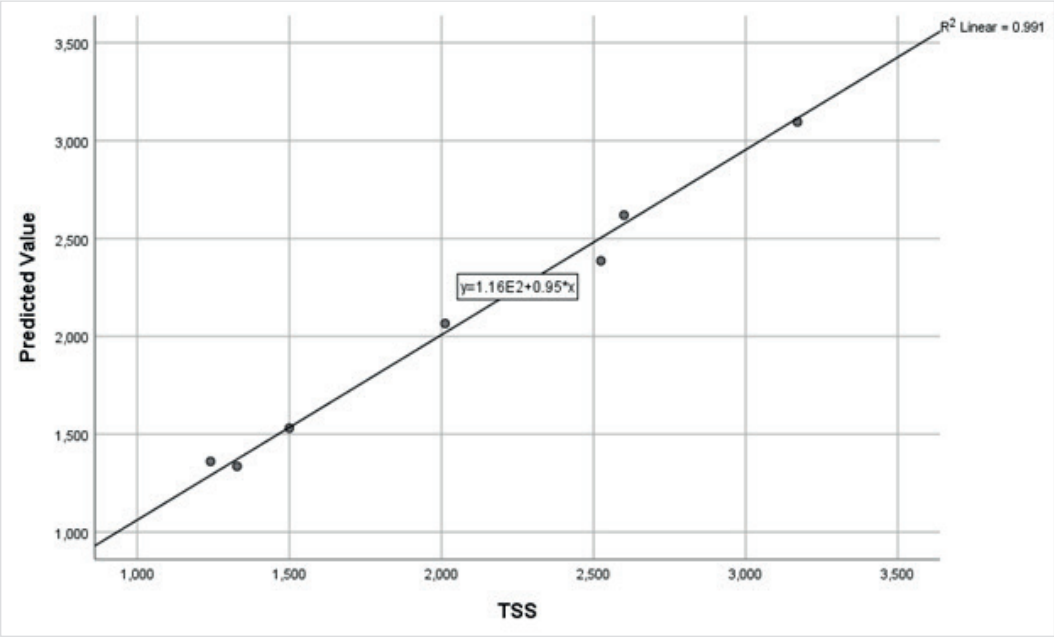


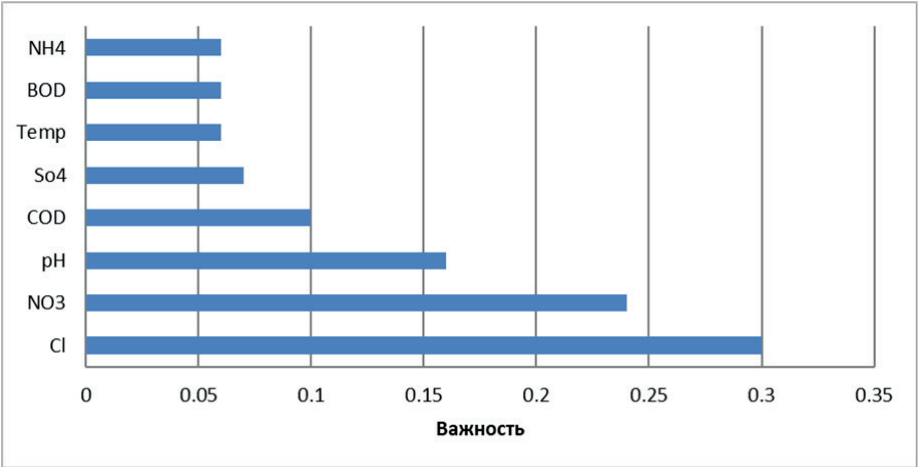
Рис. 9. Схематическое изображение модели ИНС с входными и выходными слоями (Synaptic Weight — Синаптический вес)

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*).

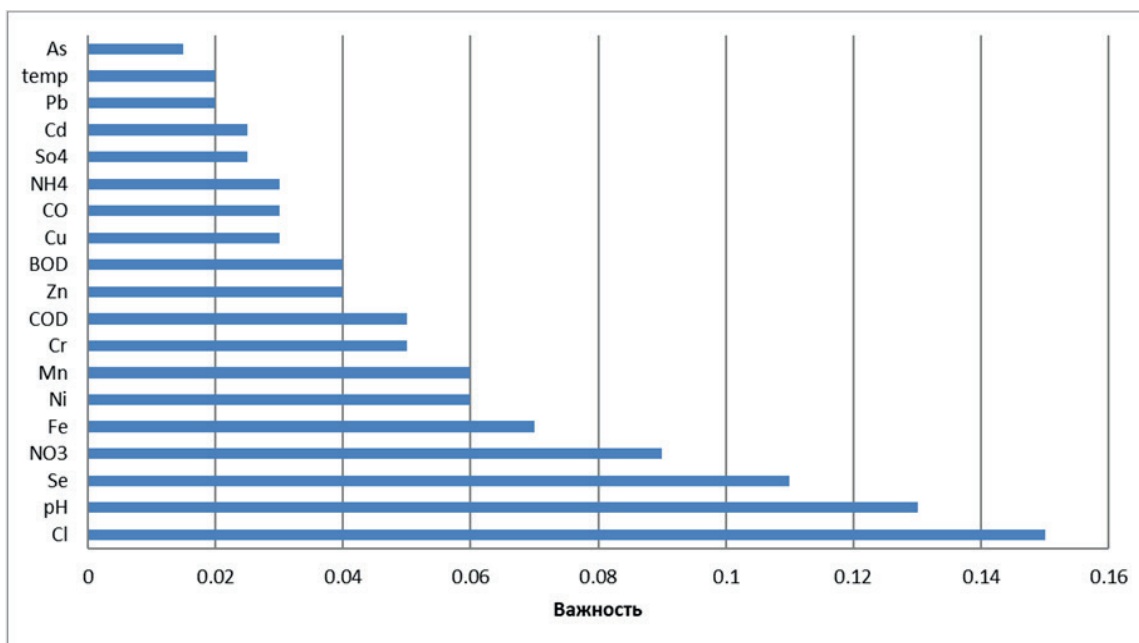


*Рис. 10.* Наблюдаемые и прогнозируемые значения TSS для первой модели (Predicted Value — Прогнозируемое значение, TSS — Общее содержание взвешенных твердых частиц)



*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 м<sup>3</sup>, 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 м<sup>3</sup>/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. Fytili 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](http://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. Tchobanoglous, *MWH’s Water Treatment: Principles and Design*, 3rd ed. Hoboken, 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<sup>\*/\*\*</sup>  
N. S. Tsarev<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Ural Federal University, Yekaterinburg

<sup>\*\*</sup> 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,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , 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 m<sup>3</sup> 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. Алишукри, 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.