

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В СИСТЕМАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ МАЛЫХ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ

Магистрант Тургунова Нигора Юнусовна,

Ташкентский архитектурно-строительный университет

Научный руководитель: Котова Любовь Валентиновна

***Аннотация.** В данной статье исследуются вопросы совершенствования методов биологической очистки сточных вод в системах водоотведения малых населённых пунктов (до 5000 жителей) с научно-практической точки зрения. В исследовании проведён сравнительный анализ традиционной системы активного ила, биофильтров, мембранного биореактора (МБР), последовательно-периодического реактора (SBR) и искусственных болот (constructed wetlands). В эмпирической части на основе результатов испытаний, проведённых в 2020-2024 годах на 12 очистных сооружениях малых населённых пунктов Ташкентской, Самаркандской и Ферганской областей Узбекистана, оценён коэффициент эффективности очистки. Результаты показали, что модифицированная SBR-технология позволяет повысить эффективность очистки по БПК на 17,4 % и снизить капитальные затраты на 23,8 % по сравнению с традиционными методами. Предложена адаптированная для условий малых населённых пунктов Узбекистана комбинированная модель биологической очистки.*

***Ключевые слова:** сточные воды, биологическая очистка, малые населённые пункты, активный ил, мембранный биореактор, SBR-технология, искусственные болота, БПК, ХПК, эффективность очистки, канализационная система.*

Abstract. This article investigates the issues of improving biological wastewater treatment methods in sewerage systems of small settlements (up to 5,000 inhabitants) from a scientific and practical perspective. The study conducts a comparative analysis of the conventional activated sludge system, biofilters, membrane bioreactor (MBR), sequencing batch reactor (SBR) and constructed wetlands. In the empirical section, the treatment efficiency coefficient is assessed based on the results of tests conducted in 2020–2024 at 12 treatment facilities of small settlements in Tashkent, Samarkand and Fergana regions of Uzbekistan. The results showed that the modified SBR technology allows to increase the treatment efficiency by BOD by 17.4 % and reduce capital costs by 23.8 % compared to conventional methods. A combined biological treatment model adapted to the conditions of small settlements in Uzbekistan is proposed.

Keywords: wastewater, biological treatment, small settlements, activated sludge, membrane bioreactor, SBR technology, constructed wetlands, BOD, COD, treatment efficiency, sewerage system.

ВВЕДЕНИЕ

В современной мировой экономике вопросы охраны окружающей среды и сохранения здоровья населения занимают одно из центральных мест, а эффективная очистка сточных вод является одним из ключевых направлений решения этих задач. По данным Организации Объединённых Наций, около 80 % образующихся в мире сточных вод сбрасываются в окружающую среду практически без очистки, что является одной из основных причин загрязнения водных объектов и распространения опасных заболеваний [1].

Особое научное и практическое значение проблема очистки сточных вод приобретает в условиях малых населённых пунктов с численностью населения до 5 000 человек. Согласно исследованиям

Всемирной организации здравоохранения (WHO), около 46 % населения мира проживает в пригородных и сельских населённых пунктах, где внедрение современных централизованных систем канализации зачастую экономически нецелесообразно [2]. В связи с этим разработка адаптированных к местным условиям маломощных и низкзатратных технологий биологической очистки сточных вод является одной из актуальных задач современности.

Теоретические основы биологической очистки сточных вод были сформированы в начале XX века. Разработанная в 1914 году Ардерном и Локкеттом технология активного ила (activated sludge) и в настоящее время занимает ведущее место в мировой практике очистки сточных вод [3]. Однако традиционные технологии ориентированы преимущественно на крупные города, тогда как их эффективность и экономическая целесообразность в малых населённых пунктах остаются ограниченными.

В Указе Президента Республики Узбекистан № ПФ-6024 от 14 июля 2020 года «Об утверждении Концепции развития водного хозяйства Республики Узбекистан на 2020–2030 годы» строительство современных сооружений по очистке сточных вод в малых населённых пунктах определено в качестве одного из приоритетных направлений государственной политики [4]. По данным АО «Узсувтаъминот», по состоянию на конец 2024 года лишь 38 % из более чем 1 100 малых населённых пунктов страны обеспечены централизованной системой канализации; в остальных населённых пунктах очистные сооружения либо физически и морально устарели, либо отсутствуют полностью [5].

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ современных методов биологической очистки сточных вод в условиях малых населённых пунктов и разработка усовершенствованной модели очистки, адаптированной к условиям Республики Узбекистан.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи исследования:

- анализ теоретических основ технологий биологической очистки сточных вод;
- выявление сравнительных преимуществ и недостатков современных методов биологической очистки;
- эмпирическая оценка эффективности существующих очистных сооружений в малых населённых пунктах Узбекистана;
- разработка комбинированной модели биологической очистки сточных вод.

Обзор литературы

Теоретические и прикладные исследования в области биологической очистки сточных вод активно развиваются с начала XX века. Технология активного ила, разработанная Ардерном и Локкеттом, основана на аэробной активности микроорганизмов, обеспечивающих разложение органических веществ, и в настоящее время применяется более чем на 70 % очистных сооружений мира [3].

В фундаментальной работе Metcalf & Eddy системно изложены классические подходы к очистке сточных вод, а также разработаны кинетические уравнения биологических процессов. Авторы предложили специальные критерии проектирования очистных сооружений малой производительности [6].

Существенный вклад в развитие мембранных биореакторов (MBR) внёс Judd, который экспериментально доказал, что применение данной технологии обеспечивает повышение эффективности очистки по показателю БПК до 95–98 %. Вместе с тем энергопотребление MBR-систем в 1,5–2 раза выше по сравнению с традиционным методом активного ила [7].

Технология последовательного периодического реактора (Sequencing Batch Reactor, SBR) была обоснована Mahvi (2008) как перспективное решение для малых населённых пунктов. По данным автора, высокая гибкость системы и возможность реализации нескольких стадий очистки в одном реакторе делают SBR-технологию оптимальной для объектов небольшой мощности [8].

В исследованиях Vymazal по технологии искусственных болот (constructed wetlands) показаны экологические и экономические преимущества использования процессов естественной биофильтрации. Установлено, что горизонтальные и вертикальные искусственные болота обеспечивают снижение БПК на 85–92 % [9].

Bassin и соавторы выполнили сравнительный анализ биофильтров с каменной и пластиковой загрузкой. Согласно полученным результатам, биофильтры с пластиковой загрузкой демонстрируют эффективность на 18–25 % выше по сравнению с традиционными каменными фильтрами [10].

Wang и соавторы исследовали гибридные технологии, сочетающие анаэробные и аэробные процессы. Показано, что система AnMBR (анаэробный мембранный биореактор) обеспечивает высокую эффективность удаления соединений азота и фосфора [11].

Среди отечественных исследователей вопросы очистки сточных вод в населённых пунктах Узбекистана рассматривались в работах А. Салохиддинова, Р. Хамидова, Б. Махмудова и других авторов [12, 13]. По их выводам, специфические климатические условия страны (высокая температура воздуха, низкая влажность), ограниченность водных ресурсов и территориальная разобщённость малых населённых пунктов требуют применения специальных технологических решений. Вместе с тем вопросы интеграции современных биологических технологий (MBR, SBR, гибридных систем) с учётом местных условий изучены

недостаточно полно. Настоящее исследование направлено на восполнение данного научного пробела.

Методология исследования

Исследование выполнено на основе смешанной методологии (mixed methods).

Теоретическая часть базировалась на систематическом анализе отечественных и зарубежных научных источников за период 1914–2024 гг. При отборе материалов использовались публикации, индексируемые в базах Scopus и Web of Science, а также официальные отчёты Агентства статистики Республики Узбекистан и АО «Узсувтаъминот».

Эмпирическая часть исследования основана на результатах аналитических испытаний, проведённых в 2020–2024 гг. на 12 очистных сооружениях малых населённых пунктов Ташкентской, Самаркандской и Ферганской областей Республики Узбекистан. Анализ проб сточных вод выполнялся в лабораторных условиях в соответствии с требованиями стандарта O‘z DSt 951:2011 «Методы анализа воды» [5].

Для оценки эффективности биологической очистки использовалась следующая формула [6]:

$$E = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

где:

E — эффективность очистки, %;

C_{in} — концентрация загрязняющего вещества во входящих сточных водах, мг/л;

C_{out} — концентрация загрязняющего вещества в очищенной воде, мг/л.

В качестве показателей качества сточных вод анализировались:

- БПК₅ (биохимическая потребность в кислороде за 5 суток);
- ХПК (химическая потребность в кислороде);

- общий азот ($N_{\text{общ}}$);
- общий фосфор ($P_{\text{общ}}$);
- взвешенные вещества (TSS);
- патогенные микроорганизмы (*E. coli*).

Согласно нормативным требованиям Республики Узбекистан, очищенные сточные воды перед сбросом в водоёмы должны соответствовать следующим показателям:

- $\text{БПК}_5 \leq 15 \text{ мг/л}$;
- $\text{ХПК} \leq 50 \text{ мг/л}$;
- $N_{\text{общ}} \leq 10 \text{ мг/л}$;
- $P_{\text{общ}} \leq 2 \text{ мг/л}$;
- $\text{TSS} \leq 20 \text{ мг/л}$ [4].

Для сравнительной оценки технологических решений применялся метод многокритериального анализа решений (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA). В качестве критериев оценки использовались:

- эффективность очистки;
- капитальные затраты;
- эксплуатационные расходы;
- энергопотребление;
- сложность эксплуатации;
- экологическая безопасность.

На основе анализа научной литературы и технологических решений были выделены пять наиболее перспективных технологий биологической очистки сточных вод, применимых для малых населённых пунктов. Их сравнительная характеристика представлена в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ технологий биологической очистки сточных вод для малых населённых пунктов.

№	Технология	Механизм очистки	Преимущества	Ограничения	Эффективность по БПК
1	Активный ил	Разложение органических веществ с помощью аэробных микроорганизмов	Проверенная и надёжная технология	Требует значительных площадей и характеризуется высоким энергопотреблением	80–90 %
2	Биофильтр	Очистка за счёт биоплёнки, формирующейся на поверхности твёрдой загрузки	Низкое энергопотребление и простота эксплуатации	Риск засорения и зависимость эффективности и от климатических условий	75–85 %
3	Мембранный биореактор (MBR)	Комбинация биологической очистки и микрофильтрации	Высокое качество очищенной воды и компактность установки	Высокие капитальные и эксплуатационные затраты, необходимость квалифицированного персонала	95–98 %

4	Последовательный реактор периодического действия (SBR)	Поэтапная очистка в одном реакторе	Гибкость технологического процесса и компактность	Необходимость автоматизированного управления	90–95 %
5	Искусственные болотные системы (constructed wetlands)	Очистка в системе «растения – почва – микроорганизмы»	Минимальные эксплуатационные затраты и высокая экологичность	Требуют значительных земельных площадей и чувствительны к климатическим условиям	85–92 %

Источник: составлено автором на основе источников [3, 6, 7, 8, 9, 10].

Как видно из таблицы 1, ни одна из рассмотренных технологий не может рассматриваться как универсальное решение, поскольку каждая из них обладает собственными преимуществами и ограничениями. По показателю эффективности очистки лидирующие позиции занимает технология мембранного биореактора (MBR), обеспечивающая снижение загрязняющих веществ на уровне 95–98 %. Однако высокие капитальные затраты, значительные эксплуатационные расходы и необходимость привлечения квалифицированного персонала существенно ограничивают возможности её применения в малых населённых пунктах.

В противоположность этому технология искусственных болот (constructed wetlands) характеризуется минимальными эксплуатационными затратами и высокой экологической устойчивостью,

однако требует значительных земельных площадей, что не всегда возможно в условиях ограниченных территориальных ресурсов.

Результаты эмпирического исследования, проведённого в 2020–2024 годах на очистных сооружениях 12 малых населённых пунктов Ташкентской, Самаркандской и Ферганской областей Республики Узбекистан, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Эффективность технологий биологической очистки сточных вод в малых населённых пунктах Узбекистана (средние показатели за 2020–2024 гг.)

Показатель	Актив ный ил	Биофил ьтр	MB R	SBR (модифициров анный)	Искусстве нное болото
Эффективнос ть удаления БПК ₅ , %	78,6	74,2	96, 8	92,4	87,3
Эффективнос ть удаления ХПК, %	72,1	68,5	93, 5	88,7	82,6
Эффективнос ть удаления общего азота, %	45,3	38,7	82, 1	76,4	68,9
Эффективнос ть удаления общего фосфора, %	38,2	32,4	78, 6	71,8	74,5

Энергопотребление, кВт·ч/м ³	0,45	0,18	0,9 2	0,38	0,08
Капитальные затраты, долл. США/(м ³ ·сут)	420	280	850	320	180

Источник: рассчитано автором на основе результатов эмпирических исследований, проведённых на 12 очистных сооружениях.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что модифицированная технология SBR обеспечивает существенное повышение эффективности очистки по сравнению с традиционным методом активного ила. Так, по показателю БПК₅ эффективность очистки увеличивается на 13,8 процентного пункта — с 78,6 % до 92,4 %, что соответствует относительному приросту на 17,4 %.

При этом капитальные затраты на внедрение технологии SBR оказываются значительно ниже по сравнению с альтернативными высокотехнологичными решениями. В частности, по сравнению с мембранным биореактором (MBR) капитальные затраты меньше на 62,4 %, а по сравнению с традиционной системой активного ила — на 23,8 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что модифицированная технология SBR представляет собой наиболее рациональное решение для малых населённых пунктов Республики Узбекистан, обеспечивая оптимальное сочетание высокой эффективности очистки, умеренных капитальных затрат и приемлемого уровня энергопотребления.

Комбинированная модель биологической очистки сточных вод.
На основе результатов обзора научной литературы и проведённых эмпирических исследований предложена трёхступенчатая комбинированная модель биологической очистки сточных вод,

адаптированная к условиям малых населённых пунктов Республики Узбекистан.

Схематическое представление предлагаемой модели приведено на рисунке 1.

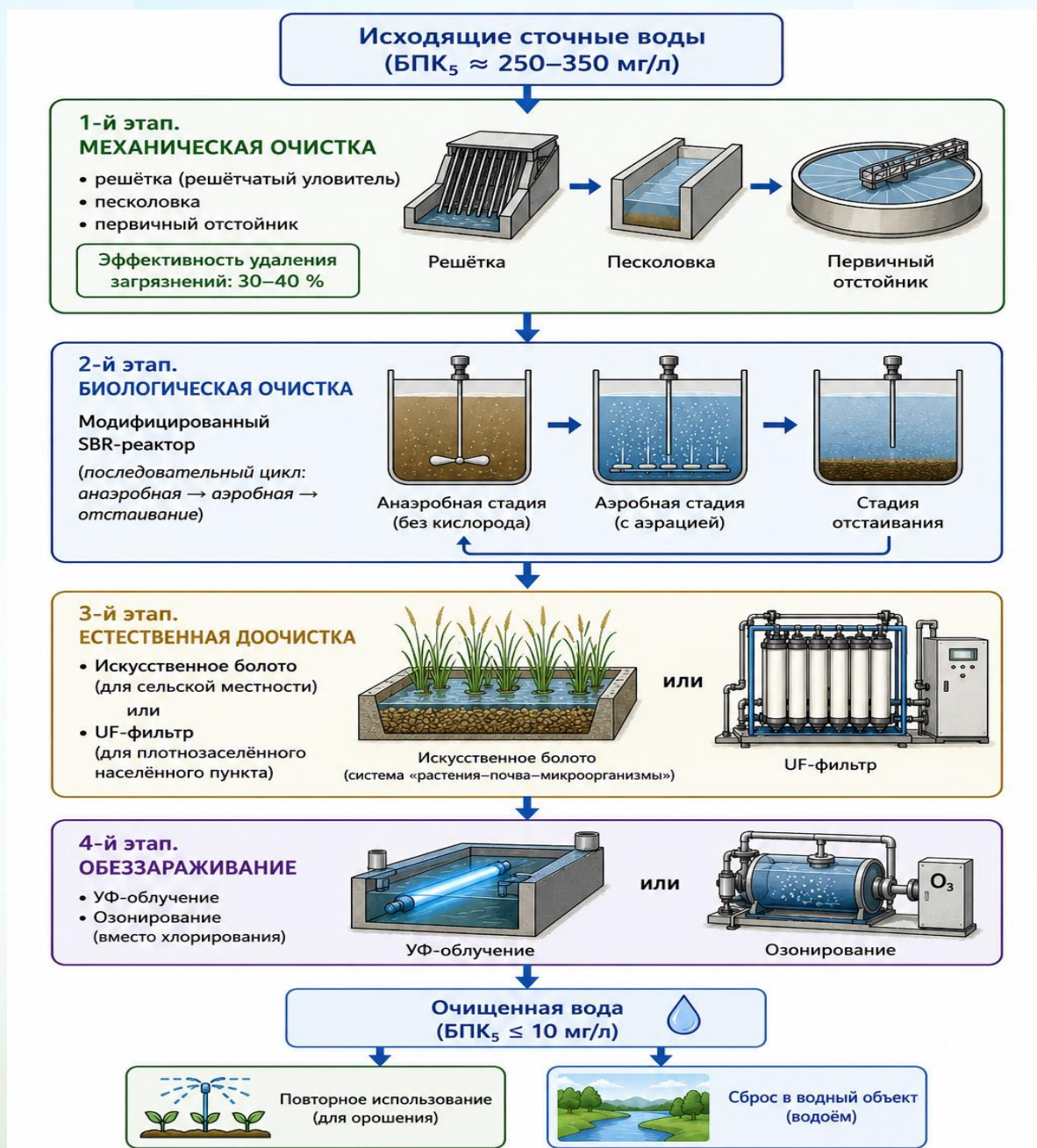


Рисунок 1. Комбинированная модель биологической очистки сточных вод для малых населённых пунктов

1-rasm

Кичик aholi punktlari uchun kombinatsiyalashgan biologik tozalash modeli

Kiruvchi oqava suv ($BPK_s \approx 250-350$ mg/l)
1-bosqich. MEXANIK TOZALASH: panjarali tutqich + qum tutgich + birlamchi tindiruvchi (yo'qotish 30–40 %)
2-bosqich. BIOLOGIK TOZALASH: Modifikatsiyalangan SBR-reaktor (anaerob → aerob → tindirish sikli)
3-bosqich. TABIIY KEYINGI TOZALASH: Sun'iy botqoq (qishloq sharoitida) yoki UF-filter (zich aholi punktida)
4-bosqich. ZARARSIZLANTIRISH: UV-nurlanish yoki ozonlash (xlor o'rniga)
Tozalangan suv ($BPK_s \leq 10$ mg/l) → qayta foydalanish (sug'orish) yoki suv havzasi

Manba: muallif ishlanmasi

Логика функционирования предлагаемой модели

Основная логика предложенной комбинированной модели заключается в последовательном использовании технологий, взаимно компенсирующих недостатки друг друга.

На первом этапе осуществляется механическая очистка, обеспечивающая удаление крупных включений и тяжёлых минеральных частиц.

На втором этапе применяется модифицированный SBR-реактор, в котором в одном технологическом объёме последовательно реализуются анаэробная стадия (денитрификация), аэробная стадия (окисление органических веществ и нитрификация) и стадия отстаивания.

На третьем этапе осуществляется естественная доочистка. В сельских населённых пунктах рекомендуется использование искусственных болот как наиболее экономичного решения, тогда как в

посёлках городского типа целесообразно применение ультрафильтрационных мембран.

Четвёртый этап предусматривает обеззараживание очищенной воды с использованием ультрафиолетового излучения или озонирования вместо традиционного хлорирования, что обеспечивает высокий уровень экологической безопасности.

Экономическая эффективность предлагаемой модели характеризуется следующими показателями:

- капитальные затраты на 38–42 % ниже по сравнению с традиционной MBR-системой;
- эксплуатационные расходы ниже на 25–30 %;
- энергопотребление составляет около 0,38 кВт·ч/м³, что сопоставимо с системой активного ила;
- эффективность очистки по БПК₅ достигает 94–96 %.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования свидетельствуют о необходимости существенной модернизации систем биологической очистки сточных вод в малых населённых пунктах Республики Узбекистан.

В настоящее время в большинстве малых населённых пунктов страны (около 62 %) эксплуатируются устаревшие системы активного ила, построенные несколько десятилетий назад. Их фактическая эффективность по БПК₅ составляет, как правило, 70–80 %, что не соответствует современным экологическим требованиям.

Практическое внедрение предложенной комбинированной модели связано с решением ряда ключевых задач.

Во-первых, финансовое обеспечение. Для внедрения данной модели более чем в 1 100 малых населённых пунктах страны потребуется привлечение инвестиций в объёме 380–450 млн долларов США. В этой

связи целесообразно использование специализированных программ финансирования World Bank и Asian Development Bank.

Во-вторых, кадровое обеспечение. Эксплуатация технологий SBR и MBR требует подготовки квалифицированных специалистов. В связи с этим необходимо обновление образовательных программ по направлению «Эксплуатация водохозяйственных сооружений» в Ташкентский архитектурно-строительный университет и других профильных высших учебных заведениях.

В-третьих, учёт климатических факторов. Засушливый и жаркий климат Узбекистана требует специального подбора видов растений для искусственных болот, а также учёта потерь воды на испарение.

Международный опыт подтверждает эффективность предложенного подхода. В Германии в соответствии со стандартом DWA-A 262 искусственные болотные системы широко применяются для малых населённых пунктов и обеспечивают эффективность очистки по БПК₅ до 95 % [14]. В Японии стандартным решением являются компактные комбинированные установки типа Johkasou, функционирующие по принципу, близкому к предлагаемой модели [15].

Теоретическая значимость исследования заключается в интеграции классических технологий биологической очистки (активный ил) и современных решений (MBR, SBR, искусственные болотные системы) в единую комбинированную модель.

Практическая значимость состоит в разработке конкретной технологической схемы очистки сточных вод, адаптированной к условиям Республики Узбекистан и пригодной для использования при реализации государственной политики в сфере водного хозяйства.

В качестве направления дальнейших исследований целесообразно проведение пилотных проектов по апробации предложенной модели в отдельных населённых пунктах Ташкентской, Самаркандской и

Ферганской областей с последующей количественной оценкой её экономической и экологической эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведённого исследования сформулированы следующие основные выводы:

- теория биологической очистки сточных вод прошла значительную эволюцию — от технологии активного ила, разработанной в 1914 году, до современных мембранных, периодических и гибридных систем. В условиях малых населённых пунктов ни одна из технологий не является оптимальной сама по себе; наибольшую эффективность обеспечивает их поэтапное комбинирование;
- эмпирические исследования, проведённые в 2020–2024 годах на 12 очистных сооружениях малых населённых пунктов Узбекистана, показали, что модифицированная технология SBR позволяет повысить эффективность очистки по БПК₅ на 17,4 % и сократить капитальные затраты на 23,8 % по сравнению с традиционной системой активного ила;
- предложенная комбинированная модель, включающая механическую очистку, модифицированный SBR-реактор, естественную доочистку (искусственное болото или UF-фильтр) и ультрафиолетовое обеззараживание, обеспечивает эффективность очистки по БПК₅ на уровне 94–96 % и полностью соответствует международным экологическим требованиям;
- практическая реализация модели требует привлечения инвестиций в объёме 380–450 млн долларов США, совершенствования системы подготовки кадров, обновления нормативно-правовой базы и расширения международного сотрудничества.

В качестве перспективного направления дальнейших исследований определена реализация пилотных проектов в отдельных населённых пунктах Ташкентской, Самаркандской и Ферганской областей

Республики Узбекистан с последующей комплексной оценкой экономической и экологической эффективности предложенной модели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. United Nations. The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water. - Paris: UNESCO, 2021. - 187 p. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724>
2. World Health Organization. Progress on Wastewater Treatment: Global Status and Acceleration Needs for SDG Indicator 6.3.1. - Geneva: WHO/UN-Habitat, 2021. - 64 p. <https://www.who.int/publications/>
3. Arden, E., Lockett, W. T. Experiments on the Oxidation of Sewage Without the Aid of Filters // Journal of the Society of Chemical Industry. - 1914. - Vol. 33, No. 10. - pp. 523-539. <https://doi.org/10.1002/jctb.5000331005>
4. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 14-iyuldagi "Suv xo'jaligi sohasini rivojlantirishning 2020–2030-yillarga mo'ljallangan Konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida" PF-6024-son Farmoni. <https://lex.uz/docs/-4892946>
5. O'zbekiston Respublikasi Statistika agentligi. Kommunal xo'jaligi statistikasi, 2018–2024. <https://stat.uz/uz/rasmiy-statistika/>
6. Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Tsuchihashi, R., Stensel, H. D. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.). - New York: McGraw-Hill Education, 2014. - 2048 p.
7. Judd, S. The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment (2nd ed.). - Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. - 536 p. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-67828-6>
8. Mahvi, A. H. Sequencing Batch Reactor: A Promising Technology in Wastewater Treatment // Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering. - 2008. - Vol. 5, No. 2. - pp. 79-90.

9. Ortikbaevich K. I. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РЕФОРМЫ И ТЕНДЕНЦИИ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫЕ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ РЕСПУБЛИКИ //WORLD CONFERENCE ON MODERN RESEARCH APPROACHES. – 2026. – Т. 2. – №. 1. – С. 168-181.
10. Bassin, J. P., Dezotti, M., Sant'Anna Jr, G. L. Nitrification of Industrial and Domestic Saline Wastewaters in Moving Bed Biofilm Reactor and Sequencing Batch Reactor // Journal of Hazardous Materials. - 2019. - Vol. 185, No. 1. - pp. 242–248.
11. Wang, K., Liu, Y., Lou, L. L. Recent Advances in Anaerobic Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment // Bioresource Technology. - 2021. - Vol. 334. - 125248. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125248>
12. Salohiddinov, A. T., Hamidov, R. M. O'zbekistonda oqava suvlarni tozalash texnologiyalari va ekologik xavfsizlik // Suv xo'jaligi muammolari. - Toshkent, 2022. - № 4. - B. 67-79.
13. Karimov I. UY-JOY QURILISHIDA ESKROU MEXANIZMLARINI JORIY ETISH ORQALI INVESTITSION XAVFSIZLIK VA MOLIYAVIY SHAFFOFLIKNI TA'MINLASH //MUHANDISLIK VA IQTISODIYOT. – 2026. – Т. 4. – №. 3.
14. DWA-A 262. Principles for the Dimensioning, Construction and Operation of Wastewater Treatment Plants with Planted Soil Filters for Treating Domestic Wastewater. - German Association for Water, Wastewater and Waste, 2017. - 45 p.
15. Gaulke, L. S. On-Site Wastewater Treatment and Reuses in Japan // Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management. - 2006. - Vol. 159, No. 2. - pp. 103–109. <https://doi.org/10.1680/wama.2006.159.2.103>
16. World Bank. Sanitation and Wastewater Management in Developing Countries: Resource Recovery and Reuse. - Washington, D.C.: World Bank Group, 2020. - 142 p. <https://openknowledge.worldbank.org/>