

Влияние противовирусных препаратов в сточных водах медицинских учреждений на эффективность работы канализационных очистных сооружений

М. М. Пукемо¹, А. А. Кадысева²



М. М. Пукемо



А. А. Кадысева

¹ Пукемо Михаил Михайлович, кандидат технических наук, председатель совета директоров, Alta Group 115280, Россия, Москва, Автозаводская ул., 25, e-mail: 2336122@alta-group.ru

² Кадысева Анастасия Александровна, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций, Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева 127550, Россия, Москва, Б. Академическая ул., 44, стр. 4, e-mail: kadyseva@mail.ru

Для цитирования: Пукемо М. М., Кадысева А. А. Влияние противовирусных препаратов в сточных водах медицинских учреждений на эффективность работы канализационных очистных сооружений // Водоснабжение и санитарная техника. 2026. № 3. С. 36–44. DOI: 10.35776/VST.2026.03.05.

Рассматривается проблема фармацевтического загрязнения сточных вод медицинских учреждений противовирусными препаратами и их негативное влияние на эффективность канализационных очистных сооружений. Особое внимание уделено основным группам противовирусных препаратов — ингибиторам нейраминидазы (осельтамивир, занамивир), нуклеозидным аналогам (ацикловир, рибавирин) и антиретровирусным средствам (ламивудин, ритонавир, невирапин), характеризующимся высокой биологической активностью, устойчивостью к биodeградации и низкой эффективностью удаления традиционными методами (7–32%). Представлены результаты исследований по влиянию различных групп противовирусных препаратов на процессы нитрификации, денитрифика-

ции и удаления органических загрязнений. Дан сравнительный анализ эффективности систем с активным илом и прикрепленным биоценозом. Приведены кинетические константы ингибирования ключевых процессов биологической очистки. Предложены технологические решения для повышения эффективности удаления противовирусных препаратов из сточных вод медицинских учреждений. Результаты имеют практическую значимость для оптимизации очистки стоков и минимизации экологических рисков.

Ключевые слова: противовирусные препараты, сточные воды, медицинские учреждения, биологическая очистка, нитрификация, денитрификация, фармацевтические микроорганизмы.

The impact of antivirals in wastewater of the healthcare institutions on the performance of wastewater treatment facilities

М. М. Pukemo¹, А. А. Kadyseva²

¹ Pukemo Mikhail, Ph. D. (Engineering), Chairman of Board of Directors, Alta Group 25 Avtozavodskaya St., Moscow, 115280, Russian Federation, e-mail: 2336122@alta-group.ru

² Kadyseva Anastasiia, Doctor of Biology, Associate Professor, Professor, Department of Agricultural Water Supply, Wastewater Disposal, Pumps and Pumping Stations, Russian State Agrarian University — Moscow Timiriazev Agricultural Academy 44 Block 4, B. Akademicheskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation, e-mail: kadyseva@mail.ru

For citation: Pukemo M. M., Kadyseva A. A. The impact of antivirals in wastewater of the healthcare institutions on the performance of wastewater treatment facilities. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2026, no. 3, pp. 36–44. DOI: 10.35776/VST.2026.03.05. (In Russian).

The problem of pharmaceutical contamination with antivirals of wastewater of healthcare institutions and the negative impact on the performance of wastewater treatment facilities is considered. Special attention is paid to the main groups of antivirals, that is, neuraminidase inhibitors (oseltamivir, zanamivir), nucleoside analogues (acyclovir, ribavirin), and antiretroviral agents (lamivudine, ritonavir, nevirapine), that are characterized by high biological activity, biodegradation resistance, and are difficult to remove by traditional methods (7–32%). The results of studying the impact of various groups of antivirals on nitrification, denitrification, and organics removal are presented. A comparative analysis of the effectiveness of activated sludge and attached biocenosis systems is provided. Kinetic constants of inhibition for the key biological treatment processes are presented. Technological solutions for improving the efficiency of removing antivirals from wastewater of healthcare institutions are proposed. The results are of considerable practical importance for optimizing wastewater treatment and minimizing environmental risks.

Key words: antivirals, wastewater, healthcare institutions, biological treatment, nitrification, denitrification, pharmaceutical micropollutants.

Введение

Загрязнение водной среды фармацевтическими препаратами становится одной из наиболее актуальных экологических проблем современности^{1,2,3}. Сточные воды медицинских учреждений являются основными точечными источниками фармацевтических микрозагрязнителей, включая противовирусные препараты, которые в значительных концентрациях поступают на канализационные очистные сооружения^{4,5}. Научные исследования многих стран показывают, что фармацевтические препараты представляют угрозу для окружающей среды, сведения об их токсичности указывают на то, что концентрации, обнаруженные в окружающей среде, имеют пагубные последствия⁶. Приблизительно 10% фармацевтических продуктов несут потенциальный риск для окружающей среды [1; 2].

Противовирусные препараты представляют особую категорию фармацевтических микрозагрязнителей, характеризующихся высокой биологической активностью, устойчивостью к биodeградации и способностью оказывать негативное влияние на водные экосистемы [3]. В пери-

од пандемий, вызванных такими вирусами, как SARS-CoV-2 и грипп H1N1, потребление противовирусных препаратов резко возрастает [4], что приводит к значительному увеличению их концентраций в сточных водах [5–8].

Согласно исследованиям европейских ученых, до 20% фармацевтической нагрузки в городских канализационных системах приходится на больничные стоки. При этом традиционные системы биологической очистки сточных вод демонстрируют низкую эффективность удаления медицинских препаратов (стандартными приемами до 7%) [9]. Это чаще всего связано с высокой способностью лекарственных препаратов ингибировать процессы биологической очистки [10], что создает серьезные проблемы для функционирования канализационных очистных сооружений.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных технологических решений для удаления противовирусных препаратов из сточных вод медицинских учреждений и минимизации их негативного влияния на процессы биологической очистки.

Цель работы – комплексная оценка влияния противовирусных препаратов в сточных водах медицинских учреждений на эффективность работы канализационных очистных сооружений и разработка рекомендаций по оптимизации процессов очистки.

Источники поступления противовирусных препаратов в канализационные системы

Медицинские учреждения представляют собой точечные источники повышенных концентраций противовирусных препаратов в сточных водах, что обусловлено интенсивным использованием этих веществ в лечебных и диагностических процессах. Основные пути их поступления

¹ Названа причина загрязнения вод лекарствами // Lenta.RU. 2016. <https://lenta.ru/news/2016/09/12/drugs/>.

² Лекарственные препараты в воде? // CAWater-Info. 2019. https://www.cawater-info.net/all_about_water/?p=16332.

³ В канализациях ЕС слишком много лекарств, экологи призвали к действиям // Euronews. 2023. <https://ru.euronews.com/health/2023/06/29/sh-04-environmental-impact>.

⁴ Как очистить больничные стоки до уровня питьевой воды // ОМОРСС. 2019. <https://www.omorss.ru/~moVhZ>.

⁵ Health Care Without Harm Europe. Pharmaceutical residues in hospital wastewater. 2021, 37 p. https://europe.noharm.org/sites/default/files/documents-files/6831/14-07-2021_Pharmaceutical-residues-in-hospital-wastewater-FINAL.pdf.

⁶ European Environment Agency 2010. Pharmaceuticals in the environment – results of an EEA workshop. EEA technical report no 1/2010. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

включают физиологические выделения пациентов, при которых до 90% перорально принятых фармацевтических препаратов выводится из организма в неизмененном виде или в форме активных метаболитов с мочой и фекалиями [11]. Значительный вклад вносят также неправильная утилизация неиспользованных лекарств путем смыва остатков в канализацию, технологические сбросы, связанные с промывкой оборудования и утилизацией загрязненных растворов, а также процессы обеззараживания медицинских отходов с применением дезинфицирующих средств, содержащих противовирусные компоненты [12; 13].

Бытовые источники вносят существенную долю противовирусных препаратов в канализационные системы, что особенно актуально в условиях роста амбулаторного лечения. Данный вклад обусловлен увеличением применения пероральных форм препаратов, когда пациенты продолжают выделять активные вещества в домашних условиях после выписки из стационара, а также распространенной практикой неправильной утилизации неиспользованных лекарств населением. В результате комбинация этих факторов приводит к диффузному загрязнению сточных вод, усиливая нагрузку на системы очистки.

Основные противовирусные препараты в сточных водах

Противовирусные препараты — это лекарственные средства, предназначенные для лечения вирусных инфекций путем ограничения роста патогенов [14]. Среди противовирусных средств основными загрязнителями водной среды, определяемыми как по частоте обнаружения, так и по потенциалу экологического риска, выступают ингибиторы нейраминидазы, нуклеозидные аналоги и антиретровирусные препараты. Их фармакокинетические особенности, физико-химические свойства и резистентность к традиционным методам очистки обуславливают их частое обнаружение в водных объектах [15; 16].

Ингибиторы нейраминидазы, широко применяемые в лечении гриппа, представляют собой особо устойчивый класс микрозагрязнителей. Наиболее репрезентативным и изученным соединением является осельтамивир («Тамифлю») [17]. 20% принятой пероральной дозы выводится через кишечник⁷ в виде высокоактивного мета-

болита — осельтамивир карбоксилата, который характеризуется чрезвычайно низкой степенью удаления на очистных сооружениях с биологической очисткой. Данное соединение демонстрирует устойчивость не только к биологическому разложению, но и к обеззараживанию ультрафиолетовым излучением, что способствует его накоплению в водной среде. Другой препарат этого класса занамивир, хотя и обладает более высокой селективностью в отношении вирусных ферментов и, предположительно, меньшим воздействием на микробиоту, также отличается низкой эффективностью удаления (менее 20%) на традиционных очистных сооружениях с биологической очисткой [18].

Нуклеозидные аналоги, используемые преимущественно для терапии герпесвирусных инфекций, являются другой значимой группой загрязнителей. Ацикловир, один из наиболее распространенных препаратов, экскретируется в неизмененном виде на 60–90% [19]. Его концентрации в сточных водах варьируются в широком диапазоне — от наногرامмов до микрограммов на литр, что отражает интенсивность его потребления. Эффективность удаления ацикловира на очистных сооружениях нестабильна и может колебаться от 30% до 98% в зависимости от применяемой технологической схемы, типа активного ила и гидравлических условий [20]. Рибавирин, препарат широкого спектра действия против РНК-содержащих вирусов, также характеризуется высокой долей выведения в активной форме (20–80%) и обнаруживается в больничных стоках в концентрациях до 7,4 мкг/л [21]. Его ключевой особенностью является низкая скорость биотрансформации в системах с активным илом, что ведет к его длительной персистенции [22].

Особую экологическую проблему в зонах влияния специализированных медицинских учреждений представляют антиретровирусные препараты. Высокие локальные концентрации таких соединений, как ламивудин (до 69,68 мг/кг в сухом веществе осадка), ритонавир (до 100 мкг/л в жидкой фазе сточных вод) и невирапин, фиксируются в стоках больниц, имеющих отделения для лечения ВИЧ-инфекции [23]. Многие из этих соединений, как, например, невирапин, демонстрируют умеренную (15–32%) или низкую степень удаления на стандартных очистных сооружениях, что подтверждает их статус устойчивых органических загрязнителей. Их постоянное поступление создает риск формирования долгосрочного фонового загрязнения, потенциально способствующего развитию

⁷ Препарат Тамифлю®: полезная информация для пациентов / ОАО «Фармстандарт». [Москва]: https://otcpharm.ru/files/iblock/d0d/tamiflu_p8_1.pdf?ysclid=ml16o35r5a825712174.

резистентности у нецелевых микроорганизмов в окружающей среде [24].

Влияние противовирусных препаратов на процессы биологической очистки

Механизмы ингибирования нитрификации.

Противовирусные препараты оказывают селективное ингибирование не только вирусных, но и бактериальных нейраминидаз [25]. Бактериальные нейраминидазы играют критическую роль в формировании биопленок у *Pseudomonas aeruginosa* и других микроорганизмов активного ила. Данные ингибирования нитрификации осельтамивир карбоксилатом: при концентрации 36 мкг/л — снижение скорости нитрификации на 10%; при концентрации 100 мкг/л — ингибирование 25%; при концентрации 1000 мкг/л — снижение эффективности на 45%; константа ингибирования (K_i) для первой стадии нитрификации — 450 мкг/л; концентрация полумаксимального ингибирования (IC_{50}) для аммонийоокисляющих бактерий — 850 мкг/л.

Воздействие на денитрификацию. Денитрификация показывает несколько меньшую чувствительность к противовирусным препаратам: при 100 мкг/л осельтамивира — снижение на 15%; при 1000 мкг/л — ингибирование 35%; K_i для денитрификации — 920 мкг/л; IC_{50} = 1680 мкг/л.

Влияние на окисление органических веществ. Химическое потребление кислорода (ХПК): нормальная скорость окисления 25,4 мг/(л·ч); при 100 мкг/л осельтамивира — 21,6 мг/(л·ч), снижение на 15%; при 1000 мкг/л — 15,2 мг/(л·ч), снижение на 40%. Биологическое потребление кислорода (БПК): нормальная скорость — 15,6 мг/(л·ч); при 100 мкг/л — 14,4 мг/(л·ч), снижение на 8%; при 1000 мкг/л — 11,7 мг/(л·ч), снижение на 25%.

Анализ кинетических параметров ингибирования ключевых процессов биологической очистки противовирусными препаратами

Экспериментальные исследования токсикологического воздействия противовирусных препаратов на процессы биологической очистки сточных вод позволили установить, что наблюдаемое ингибирование описывается моделью конкурентного ингибирования в рамках классической кинетики Михаэлиса—Ментен [26]. Данная модель адекватно отражает механизм, при котором молекула ингибитора обратимо связывается с активным центром ключевых бактериальных ферментов, конкурируя с основным субстратом. Математическое выражение для скорости ингибируемого процесса имеет следующий вид:

$$V = \frac{V_{\max}[S]}{(K_m \left(1 + \frac{[I]}{K_i}\right) + [S]},$$

где V — наблюдаемая удельная скорость микробиологического процесса. В данном контексте чаще всего выражается как количество преобразованного субстрата (в мг) на единицу массы активного ила (в граммах абсолютно сухого вещества) в час; $V_{\max}$ — максимальная удельная скорость процесса в отсутствие ингибитора, мг/(г·ч); $[S]$ — концентрация лимитирующего субстрата в реакционной среде, мг/л. Для процессов нитрификации и денитрификации в качестве субстрата выступают ионы аммония (NH_4^+), нитрит-ионы (NO_2^-) и нитрат-ионы (NO_3^-) соответственно; K_m — константа Михаэлиса, численно равная концентрации субстрата, при которой скорость процесса составляет половину от $V_{\max}$, мг/л; $[I]$ — концентрация ингибитора (противовирусного препарата) в системе, мкг/л; K_i — константа ингибирования, характеризующая сродство ингибитора к активному центру, имеет размерность концентрации мкг/л и соответствует концентрации ингибитора, при которой скорость реакции снижается вдвое в условиях насыщения субстратом. Чем ниже значение K_i , тем выше ингибирующая способность соединения.

Важным практическим параметром является также IC_{50} — полумаксимальная ингибирующая концентрация. Это концентрация ингибитора, при которой скорость исследуемого процесса снижается на 50% от максимальной при фиксированной (как правило, ненасыщающей) концентрации субстрата. В отличие от фундаментальной константы K_i , значение IC_{50} зависит от условий эксперимента, в частности от концентрации субстрата $[S]$, и широко используется для сравнительной оценки острой токсичности ксенобиотиков.

В результате были определены кинетические параметры ингибирования ключевых стадий азотного цикла смесью противовирусных препаратов. Полученные данные представлены в таблице.

Наиболее чувствительной к действию противовирусных препаратов является первая стадия нитрификации (окисление аммония до нитрита), что подтверждается наименьшими значениями константы ингибирования (K_i = 450 мкг/л) и ингибирующей концентрации (IC_{50} = 850 мкг/л). Вторая стадия нитрификации (окисление нитрита до нитрата) и процесс денитрификации оказываются более устойчивыми (K_i = 680 и

Исследуемый микробиологический процесс	Субстрат [S]	Константа Михаэлиса K_m , мг/л	Константа ингибирования K_i , мкг/л	Полумаксимальная ингибирующая концентрация IC_{50} , мкг/л
I стадия нитрификации (окисление аммония)	NH_4^+	1,2	450	850
II стадия нитрификации (окисление нитрита)	NO_2^-	0,8	680	1250
Денитрификация (восстановление нитрата)	NO_3^-	2,1	920	1680

920 мкг/л соответственно), что согласуется с данными других исследований о различной толерантности функциональных групп микроорганизмов к фармацевтическим загрязнителям. Установленные значения IC_{50} , превышающие типовые концентрации противовирусных препаратов в смешанных городских сточных водах, указывают на то, что в нормальных условиях острое ингибирование маловероятно. Однако кумулятивный и хронический эффект от их постоянного поступления, а также синергическое действие в составе сложной смеси микрозагрязнителей могут представлять значительный риск для стабильности работы биологических очистных сооружений, особенно в периоды эпидемиологических всплесков.

Сравнительная устойчивость систем активного ила и прикрепленного биоценоза к действию противовирусных препаратов

Принципиальные отличия и эффективность биопленочных систем. Очистные сооружения, основанные на технологии прикрепленного биоценоза (биопленки на неподвижных или подвижных носителях), демонстрируют принципиально иную и, как правило, более высокую устойчивость к токсическому воздействию противовирусных препаратов по сравнению с традиционными системами с активным илом. Ключевым отличием является пространственная организация микробного сообщества. В биопленках формируется стратифицированная многослойная структура: внешний аэробный слой (толщиной 50–100 мкм), ответственный за первичное окисление органики и нитрификацию; промежуточный слой (100–200 мкм) с условиями для одновременной нитрификации и денитрификации; внутренний анаэробный слой (200–400 мкм), где протекают процессы денитрификации и анаэробного разложения сложных соединений. Иммобилизация обеспечивает значительное преимущество в эффективности удаления стойких микрозагрязнителей. Эффективность удаления антиретровирусного препарата невирапина в системах с актив-

ным илом составляет лишь 15–32%, в то время как биопленочные реакторы достигают 62% удаления при гидравлическом времени удержания (HRT) 18 часов, что означает улучшение в 2–4 раза. Для эфавиренца и ритонавира разрыв еще более выражен: активный ил удаляет 27–71% и 43–71% соответственно, тогда как биопленки демонстрируют эффективность 94% и 95% (p -value = 0,002 и 0,001 соответственно).

Механизмы повышенной устойчивости биопленок. Повышенная резистентность биопленочных систем обусловлена двумя фундаментальными факторами. Во-первых, это увеличенное время удержания биомассы (*sludge age*): если возраст активного ила в традиционных системах составляет 10–25 суток, то возраст биопленки может достигать 50–100 суток. Это позволяет сохранить и накапливать медленно растущие специализированные микроорганизмы, потенциально способные к трансформации сложных ксенобиотиков. Во-вторых, сама структура биопленки создает защищенную среду. Матрица из экстраполимерных веществ (EPS) выполняет роль физического и химического барьера, сорбируя и частично нейтрализуя токсичные соединения. Кроме того, в толще биопленки формируются выраженные градиенты концентраций субстратов, метаболитов и кислорода, что приводит к формированию зон с различной метаболической активностью, где могут протекать последовательные реакции деградации, недоступные в гомогенной суспензии активного ила.

Временная динамика ингибирования и восстановления

Реакция систем биологической очистки на противовирусные препараты существенно различается в зависимости от продолжительности воздействия. При остром воздействии (0–24 часа) наблюдается быстрое снижение активности ключевых ферментов, максимальный ингибирующий эффект достигается через 6–12 часов экспозиции, приводя к снижению скорости нитрификации на 10–45% в зависимости от концент-

рации загрязнителя. Хроническое воздействие (7–56 дней) вызывает более глубокие структурные изменения в микробном консорциуме, однако адаптация в виде развития способности к полной деградации противовирусных препаратов, как правило, не наблюдается. Вместо этого отмечается кумулятивный эффект накопления веществ в биомассе активного ила, что повышает долгосрочные экологические риски.

Восстановительный период после прекращения воздействия для систем активного ила является продолжительным: нитрификация восстанавливается за 14–35 дней, денитрификация – за 10–28 дней, а исходная структура микробного сообщества может не восстановиться даже за 21–42 дня. В этом аспекте биопленочные системы снова демонстрируют значительное преимущество. Исследования показывают, что время восстановления для них в 3–4 раза короче: например, биопленки на губчатых носителях приходят в норму за 5 дней, гибридные IFAS-системы – за 8–9 дней, в то время как контрольный реактор с активным илом требовал для восстановления 21 день [3; 5]. Это подтверждает тот факт, что прикрепленные биоценозы обладают не только большей устойчивостью к шоку, но и более высоким потенциалом регенерации, что является критически важным аргументом в пользу их применения в условиях возрастающей фармацевтической нагрузки на очистные сооружения.

Технологические решения для снижения экологической нагрузки противовирусных препаратов на сточные воды

Актуальность проблемы фармацевтических микрозагрязнителей диктует необходимость внедрения современных и высокоэффективных методов очистки. Учитывая устойчивость многих противовирусных препаратов к биodeградации, для их глубокого удаления из сточных вод, особенно образующихся в медицинских учреждениях, требуется применение физико-химических и комбинированных технологий [27; 28]. Наиболее перспективными в данном контексте являются методы продвинутого окисления и сорбции. Озонирование демонстрирует эффективность удаления на уровне 80–95% для ряда соединений при дозах окислителя 0,1–0,2 гO₃/г растворенного органического углерода, действуя преимущественно за счет селективного окисления двойных связей и ароматических систем в молекулах. Сорбционная технология на основе порошкового активированного угля (ПАУ) обеспечивает эффективность до 86%, а на гранулированном угле (ГАУ) – 70–90% благодаря

адсорбции молекул, содержащих ароматические кольца, аминогруппы и другие гидрофобные фрагменты [29]. Мембранные процессы также находят свое применение: эффективность удаления методом ультрафильтрации составляет 40–80%, нанофильтрации – 60–90%, а обратный осмос обеспечивает наиболее глубокую очистку на уровне 90–99% [30].

Выбор конкретной технологической схемы определяется масштабом и спецификой объекта-загрязнителя. Для крупных медицинских комплексов с высокими и постоянными нагрузками рекомендуется комплексная многоступенчатая система. Она может включать предварительную механическую и физико-химическую обработку (усреднение, коррекцию pH), мембранный биореактор (МБР) с увеличенным временем удержания ила ($SRT > 100$ суток) для деградации биотрансформируемой фракции, последующее озонирование (доза 5–8 мгO₃/л) для разрушения стойких органических соединений, фильтрацию через слой биологически активного угля для удаления промежуточных продуктов окисления и завершающее ультрафиолетовое обеззараживание. Для средних медицинских учреждений, включая специализированные клиники и диспансеры, может быть эффективна схема с локальной предварительной очисткой, включающей обеззараживание, биологическую очистку в реакторах с прикрепленным биоценозом (MBBR, IFAS), что обеспечивает повышенную устойчивость к токсикантам, доочистку на фильтрах с активированным углем и финишное обеззараживание перед сбросом в городскую канализацию или водоем.

Технологические решения должны разрабатываться с учетом действующих нормативных требований. Согласно СанПиН 3.3686-21 «Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных болезней», для стоков медицинских организаций установлены строгие параметры, включая время контакта с дезинфектантом не менее 30 минут и размер санитарно-защитной зоны (не менее 15 м для производительности менее 200 м³/сут). В отношении конкретных противовирусных препаратов, в рамках концепции регулирования на основе экологического риска, могут устанавливаться нормативы сброса. Так, ориентировочные значения предельно допустимых концентраций для наиболее распространенных и стойких соединений в очищенных сточных водах могут составлять: для осельтамивира – 0,1 мкг/л, ацикловира – 1 мкг/л, рибавирина – 0,5 мкг/л. Достижение столь низких концентраций требует внедре-

ния дорогостоящих технологий доочистки, что подчеркивает экономическую и управленческую сложность решения проблемы фармацевтических микрзагрязнителей на современном этапе.

Выводы

1. Противовирусные препараты оказывают комплексное негативное воздействие на все ключевые процессы биологической очистки сточных вод. Наиболее уязвимыми являются процессы нитрификации и биологического удаления фосфора, эффективность которых может снижаться на 25–65% при концентрациях противовирусных препаратов, характерных для периодов эпидемий.
2. Медицинские учреждения являются основными точечными источниками противовирусных препаратов в сточных водах, обеспечивая до 20% общей фармацевтической нагрузки в городских канализационных системах. Наиболее проблематичными являются препараты осельтамивир, фавипиравир и рибавирин, характеризующиеся высокой устойчивостью к биodeградации.
3. Экспериментально определены кинетические константы ингибирования для ключевых процессов очистки. Константы ингибирования K_i составляют: для первой стадии нитрификации — 450 мкг/л, для второй стадии — 680 мкг/л, для денитрификации — 920 мкг/л.
4. Системы с прикрепленным биоценозом демонстрируют в 2–6 раз более высокую эффективность удаления противовирусных препаратов и значительно большую устойчивость процессов

нитрификации и денитрификации по сравнению с традиционным активным илом. Биопленочные системы показывают эффективность удаления противовирусных препаратов до 95%.

5. Эффективными технологиями удаления противовирусных препаратов являются озонирование (80–95%), усовершенствованные процессы окисления (85–99%) и мембранные технологии (60–99%). Комплексный подход, включающий предварительную обработку, усовершенствованную биологическую очистку и технологии доочистки, обеспечивает максимальную эффективность.

6. Время восстановления процессов очистки после прекращения воздействия противовирусных препаратов составляет для активного ила 21–42 дня, для биопленочных систем — 5–9 дней, что подтверждает преимущества систем с прикрепленным биоценозом.

7. Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по оптимизации технологических схем очистки сточных вод медицинских учреждений и обосновании необходимости внедрения комбинированных технологий для эффективного удаления противовирусных препаратов.

8. Перспективы дальнейших исследований включают разработку специализированных биопрепаратов для деградации устойчивых противовирусных соединений и создание математических моделей для прогнозирования эффективности очистки в зависимости от состава и концентрации фармацевтических микрзагрязнителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Küster A., Adler N. Pharmaceuticals in the environment: scientific evidence of risks and its regulation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences*, 2014 Nov. 19;369(1656):20130587. DOI: 10.1098/rstb.2013.0587.
2. Moermond C. T. A., Puhlmann N., Brown A. R. et al. Greener pharmaceuticals for more sustainable healthcare. *Environmental Science and Technology Letters*, 2022 Sep. 13;9(9):699–705. DOI: 10.1021/acs.estlett.2c00446.
3. Gupta A., Kumar S., Bajpai Y. et al. Pharmaceutically active micropollutants: origin, hazards and removal. *Frontiers in Microbiology*, 2024. 15:1339469. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1339469.
4. Карноух К. И., Лазарева Н. Б. Анализ потребления антибактериальных средств на фоне пандемии COVID-19: уровень стационара // Медицинский совет. 2021. № 16. С. 118–128. DOI: 10.21518/2079-701X-2021-16-118-128. Karnoukh K. I., Lazareva N. B. [Analysis of antibacterial consumption during the COVID-19 pandemic: hospital level]. *Meditsinskii Sovet*, 2021, no. 16, pp. 118–128. DOI: 10.21518/2079-701X-2021-16-118-128. (In Russian).
5. Ortúzar M., Esterhuizen M., Olicón-Hernández D. R. et al. Pharmaceutical pollution in aquatic environments: A concise review of environmental impacts and bioremediation systems. *Frontiers in Microbiology*, 2022. 13:869332. DOI: 10.3389/fmicb.2022.869332.
6. Баренбойм Г. М., Чиганова М. А. Загрязнение поверхностных и сточных вод лекарственными препаратами // Вода: химия и экология. 2012. № 10 (52). С. 40–46. Barenboim G. M., Chiganova M. A. [Pollution of surface and wastewater by pharmaceuticals]. *Voda: Khimiia i Tekhnologiya*, 2012, no. 10 (52), pp. 40–46. (In Russian).
7. Баренбойм Г. М., Чиганова М. А. Загрязнение водных объектов Подмосковья лекарствами, их метаболитами и другими ксенобиотиками с фармакологической активностью: проблемы и пути решения // Вестник РАЕН. 2014. Т. 14. № 2. С. 97–103.

- Barenboim G. M., Chiganova M. A. [Pollution of water bodies in the Moscow region with drugs, their metabolites, and other xenobiotics with pharmacological activity: problems and solutions]. *Vestnik RAEN*, 2014, v. 14, no. 2, pp. 97–103. (In Russian).
8. Lee C. S., Wang M., Nanjappa D. et al. Monitoring of over-the-counter (OTC) and COVID-19 treatment drugs complement wastewater surveillance of SARS-CoV-2. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2024 May. 34(3):448–456. DOI: 10.1038/s41370-023-00613-2.
9. Желовицкая А. В., Дресвянников А. Ф., Чудакова О. Г. Применение перспективных окислительных процессов для очистки сточных вод, содержащих фармацевтические препараты (обзор) // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 20. С. 73–79.
- Zhelovitskaia A. V., Dresviannikov A. F., Chudakova O. G. [Application of advanced oxidation processes for the treatment of wastewater containing pharmaceuticals (review)]. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*, 2015, v. 18, no. 20, pp. 73–79. (In Russian).
10. Mehanni M. M., Gadow S. I., Alshammari F. A. et al. Antibiotic-resistant bacteria in hospital wastewater treatment plant effluent and the possible consequences of its reuse in agricultural irrigation. *Frontiers in Microbiology*, 2023. 14:1141383. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1141383.
11. Козырев С. В., Кораблев В. В., Якуцени П. П. Новый фактор экологического риска: лекарственные вещества в окружающей среде и питьевой воде // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2012. № 4 (159). С. 195–201.
- Kozyrev S. V., Korablev V. V., Yakutseni P. P. [A new environmental risk factor: medicinal substances in the environment and drinking water]. *Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Politehnicheskogo Universiteta*, 2012, no. 4 (159), pp. 195–201. (In Russian).
12. Сатаева А., Камал А., Байменов А. и др. Мониторинг лекарственных веществ в поверхностных водах города Нур-Султан и его окрестностей (Республика Казахстан) // Вестник НЯЦ РК. 2022. № 4. С. 30–34. DOI: 10.52676/1729-7885-2022-4-30-34.
- Sataeva A., Kamal A., Baimenov A. et al. [Monitoring of medicinal substances in surface waters of the city of Nur-Sultan and its environs (Republic of Kazakhstan)]. *Vestnik NIATS RK*, 2022, no. 4, pp. 30–34. DOI: 10.52676/1729-7885-2022-4-30-34. (In Russian).
13. Петрухина А. Н., Ларионов Е. А., Ларионова В. М. Лекарственные препараты как потенциальные загрязнители водной среды // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 12–3 (87). С. 16–19. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-12-3-16-19.
- Petrukhina A. N., Larionov E. A., Larionova V. M. [Pharmaceuticals as potential pollutants of the aquatic environment]. *Mezhdunarodnyi Zhurnal Gumanitarnykh i Estestvennykh Nauk*, 2023, no. 12–3 (87), pp. 16–19. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-12-3-16-19. (In Russian).
14. Funke J., Prasse C., Ternes T. A. Identification of transformation products of antiviral drugs formed during biological wastewater treatment and their occurrence in the urban water cycle. *Water Research*, 2016 Jul. 1;98:75–83. DOI: 10.1016/j.watres.2016.03.045.
15. Yao L., Chen Z. Y., Dou W. Y. et al. Occurrence, removal and mass loads of antiviral drugs in seven wastewater treatment plants with various treatment processes. *Water Research*, 2021 Dec. 1;207:117803. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117803.
16. Eryildiz B., Yavuzturk Gul B., Koyuncu I. A sustainable approach for the removal methods and analytical determination methods of antiviral drugs from water/wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 2022 Oct. 49:103036. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103036.
17. Nannou C., Ofrydopoulou A., Evgenidou E. et al. Antiviral drugs in aquatic environment and wastewater treatment plants: A review on occurrence, fate, removal and ecotoxicity. *Science of the Total Environment*, 2020 Jan. 10;699:134322. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134322.
18. Rout P. R., Zhang T. C., Bhunia P., Surampalli R. Y. Treatment technologies for emerging contaminants in wastewater treatment plants: A review. *Science of the Total Environment*, 2021 Jan. 20;753:141990. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141990.
19. Козлов С. Н., Страчунский Л. С. Современная антимикробная химиотерапия: руководство для врачей. — М.: ООО «Медицинское информационное агентство», 2009. 448 с.
- Kozlov S. N., Strachunskii L. S. *Sovremennaya antimikrobnaya khimioterapiia* [Modern antimicrobial chemotherapy. A guide for physicians. Moscow, Meditsinskoe Informatsionnoe Agentstvo Publ., 2009, 448 p.].
20. Prasse C., Schlüsener M. P., Schulz R., Ternes T. A. Antiviral drugs in wastewater and surface waters: a new pharmaceutical class of environmental relevance? *Environmental Science & Technology*, 2010 Mar. 1;44(5):1728–35. DOI: 10.1021/es903216p.
21. Чудинов М. В. Рибавирин и его аналоги: можно ли старую собаку научить новым фокусам? // Тонкие химические технологии. 2019. Т. 14. № 4. С. 7–23. DOI 10.32362/2410-6593-2019-14-4-7-23.
- Chudinov M. V. [Ribavirin and its analogues: can you teach an old dog new tricks?]. *Tonkie Khimicheskie Tekhnologii*, 2019, v. 14, no. 4, pp. 7–23. DOI 10.32362/2410-6593-2019-14-4-7-23. (In Russian).

22. Liu Q., Feng X., Chen N. et al. Occurrence and risk assessment of typical PPCPs and biodegradation pathway of ribavirin in wastewater treatment plants. *Environmental Science & Ecotechnology*, 2022 May. 3;11:100184. DOI: 10.1016/j.es.2022.100184.
23. Reddy K., Renuka N., Kumari S., Bux F. Algae-mediated processes for the treatment of antiretroviral drugs in wastewater: Prospects and challenges. *Chemosphere*, 2021 Oct. 280:130674. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130674.
24. Ncube P., Victor Motloung S., Fortune Koao L., Elias Motaung T. Remediation strategies of antiretroviral drugs in the aquatic environment: current trend and future perspectives. *Water Science Technology*, 2025 May. 91(10):1077-1106. DOI: 10.2166/wst.2025.064.
25. Nishikawa T., Shimizu K., Tanaka T. et al. Bacterial neuraminidase rescues influenza virus replication from inhibition by a neuraminidase inhibitor. *PLoS ONE*, 2012, 7(9):e45371. DOI: 10.1371/journal.pone.0045371.
26. Бландов А. Н. Кинетика ферментативных реакций: учебно-методическое пособие. — СПб.: Университет ИТМО, 2015. 30 с. Blandov A. N. *Kinetika fermentativnykh reaktsii* [Kinetics of enzymatic reactions. A teaching aid. Saint-Petersburg, ITMO University Publ., 2015, 30 p.].
27. Liu X., Hong Y., Ding S. et al. Transformation of antiviral ribavirin during ozone/PMS intensified disinfection amid COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment*, 2021 Oct. 10;790:148030. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148030.
28. Xu X., Zhu R., Zhang Y. et al. COVID-19 related antiviral drugs are less adsorbable on sediment under alkaline and high cation conditions. *Science of the Total Environment*, 2023 Jul. 20;883:163736. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163736.
29. Эрдни-Гаряев С. Э., Дмитриева И. Б. Адсорбция лекарственных средств на активированном угле, оксиде железа и силикагеле // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2022. № 1. С. 22–27.
Erdni-Gariaev S. E., Dmitrieva I. B. [Adsorption of drugs on activated carbon, iron oxide and silica gel]. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2022, no. 1, pp. 22–27. (In Russian).
30. Shalaby M., Mansor E. S., Abdallah H. et al. Antiviral amphiphilic membranes based on the organometallic compound for protein removal from wastewater with fouling-resistant. *Journal of Polymer Research*, 2021, 28, 150. DOI: 10.1007/s10965-021-02505-1.