

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ

С. Н. Савдур, В. Л. Воронцова

**Реферат.** Системный анализ процесса очистки сточных вод животноводческих ферм является важным этапом в обеспечении экологической безопасности и устойчивого развития животноводства. Основной целью работы является повышение эффективности процесса очистки сточных вод животноводческих ферм на основе системного анализа. Сточные воды, образующиеся на фермах, содержат высокий уровень органических загрязнителей, патогенных микроорганизмов и питательных веществ, что может существенно влиять на качество окружающей среды. Для решения данной проблемы был применен комплексный подход, который включал в себя гидрологические, биохимические и технологические аспекты. Рассмотрена возможность внедрения современных биотехнологий, что позволит существенно снизить негативное воздействие на экологию и повысить уровень устойчивости животноводческих предприятий. В зависимости от источников загрязнения и основных загрязнителей были разработаны технические решения по снижению объема сточных вод, их очистке. Эффективность их функционирования можно обеспечить с помощью современных методов обработки информации, применяя методы системного анализа сложных объектов на основе математического описания технологического процесса. Разработана системная двухуровневая модель для исследования закономерностей функционирования аппарата биоочистки в условиях динамически изменяющихся параметров технологического процесса. Для анализа состояния системы очистки в целом и прогнозирования развития внештатных ситуаций была создана программная реализация системы очистки сточных вод животноводческих ферм.

**Ключевые слова:** сельское хозяйство, сети Петри, модифицированные сети Петри.

**Для цитирования:** Савдур С.Н., Воронцова В.Л. Моделирование системы очистки сточных вод животноводческих ферм // Агробиотехнологии и цифровое земледелие. 2024. № 4(12). С.59-67

**Введение.** Сельское хозяйство – активный и масштабный источник загрязнения водных объектов биогенными элементами, пестицидами, органическими и минеральными веществами [1].

Неконтролируемыми точечными источниками загрязнения водных объектов посредством сельского хозяйства являются пестициды и удобрения, которые используются на полях для повышения урожайности. При дожде или поливе, эти химикаты могут смываться с земельных участков и попадать в реки, озера и другие водоемы, что приводит к ухудшению качества воды. Подобное загрязнение становится особенно актуальным в регионах с интенсивным сельским хозяйством, где применение агрохимикатов имеет массовый характер.

Необходимо также отметить, что недостаточная организация систем хранения и утилизации твердых и жидких отходов на фермах способствует дальнейшему загрязнению. Сточные воды, содержащие сельскохозяйственные химикаты и органические вещества, нередко попадают в реки и озера, понижая их биологическое разнообразие [2, 3].

Важным шагом для смягчения негативного воздействия этих источников загрязнения является внедрение экологически чистых технологий в аграрном производстве и разработка эффективных систем управления водными ресурсами. Образовательные программы для фермеров относительно устойчивых практик могут стать ключевым фактором в сохранении водных экосистем и повышении устойчивости сельского хозяйства.

Стоки животноводческих хозяйств и птицеферм, содержащие значительное количество загрязняющих агентов (тяжелых металлов,  $N_2, P_4, S_2$ ), составляют наиболее существенную угрозу с точки зрения негативного влияния на природные водоёмы [4]. Следует отметить, что крупное животноводческое предприятие в день должно утилизировать не менее ста кубометров стоков; в некоторых случаях объём достигает полутора тысяч кубометров [5]. При этом наибольший ущерб водным объектам и прибрежным зонам наносится вследствие недостаточно качественной очистки стоков животноводческих хозяйств, что, в свою очередь, обусловлено несовершенством используемых средств и методов очищения [6]. Многие хозяйства накапливают на собственной территории твёрдые и полутвёрдые отходы, тогда как жидкие производственно сливаются [7, 8]. На примере интенсивного разведения скота в сельскохозяйственных регионах можно наблюдать, как неуправляемые сточные воды попадают в близлежащие водоемы. Стоки, содержащие избыток органических веществ, нитратов и фосфатов, способствуют развитию избыточной растительности, что приводит к ухудшению качества воды. Это явление, известное как эвтрофикация, вызывает массу негативных последствий, включая кислородное голодание, что угрожает жизни водных экосистем.

При этом особую тревогу вызывают не только агрономические показатели, но и здоровье местного населения, поскольку загрязненная вода может стать источником различных заболеваний. Тяжелые металлы

представляют собой долгосрочную угрозу, попадая в пищевые цепочки.

Необходимость внедрения эффективных систем очистки сточных вод и применения современных технологий для минимизации выбросов становится критически важной. Защита водных объектов от загрязнений требует комплексного подхода и активного участия как со стороны государства, так и со стороны аграриев, чтобы обеспечить экологическое благополучие и устойчивое развитие региона.

Во многих случаях стоки животноводческих ферм оказывают на природные водоёмы негативное влияние из-за недооснащённости хозяйств соответствующим техническим оборудованием, а также отсутствием очистных сооружений [9, 10, 11]. При этом основанные на математическом подходе к технологиям очистки методы системного анализа способны обеспечить в рассматриваемом случае положительный результат [12, 13, 14].

За счёт построения компьютерных моделей анализируемых объектов разрабатываются оптимальные методы и системы управления, а также проводится масштабный анализ внутреннего устройства объекта, выявляются закономерности его функционирования и строятся прогнозы для экстренных условий с учётом вероятности воздействия тех или иных факторов [15, 16].

Цель работы: Оптимизация процессов очистки сточных вод животноводческих ферм на основе принципа системного анализа.

**Условия, материалы и методы.** Были применены методы системного анализа, которые включают в себя гидрологические, биохимические и технологические аспекты. При этом оптимизация процессов очистки сточных вод с использованием принципов системного анализа может существенно повысить эффективность этих процессов и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

При применении системного анализа предложен подход, начиная с детального изучения процессов и методов. Этот подход включает в себя несколько ключевых этапов:

- сбор данных: необходимо провести мониторинг текущих процессов очистки сточных вод на фермах. Это включает в себя анализ объемов и состава сточных вод, а также оценку эффективности существующих систем очистки;

- идентификация проблем: на основе собранных данных выявляются основные проблемы, связанные с процессами очистки. Это могут быть недостаточная эффективность, высокие затраты на эксплуатацию и обслуживание оборудования, отсутствие необходимых технологий и др;

- разработка и оценка альтернатив: на данном этапе важно рассмотреть различные методы очистки. Примеры включают механическую, биологическую и химическую очистку, а также использование биофильтров и

современных технологий, таких как мембранная фильтрация и нанотехнологии для повышения эффективности очистных систем;

- внедрение решений: на основе проведенного анализа и оценки альтернатив разрабатывается план внедрения оптимизированных процессов очистки на фермах. Это может включать в себя модернизацию существующих систем, обучение персонала и внедрение новых технологий;

- мониторинг и корректировка: после внедрения новшеств важно продолжать мониторинг процессов очищения сточных вод и вносить корректировки на основе реальных данных. Это обеспечит постоянное совершенствование системы и адаптацию к изменяющимся условиям.

Также в работе были применены методы компьютерного моделирования, теории сетей Петри, теории графов. Средства SCADA-технологии использовались для создания программного обеспечения на основе объектно-ориентированного подхода, в рамках современных концепций информационных технологий. Компьютерное моделирование осуществляется в рамках данных методов.

Сложная система, представляющая собой современные технологические линии и биотехнологические продукты, характеризуется сложной многоуровневой структурой взаимосвязи эффектов физических, химических и биологических свойств, а также наличием прямых и обратных потоков между техническими устройствами. Для изучения этой системы применялась стратегия системного анализа, которая позволяет осуществлять синтез технических схем с использованием методов автоматического расчета и оптимального проекта биотехнологических методов.

При математическом моделировании биотехнологических систем на компьютере, важно создать иерархическую структуру модели, где каждый уровень содержит описание своих явлений. Таким образом, системный анализ позволил эффективно решить задачи в области математического исследования и моделирования.

Среди множества принципов, которые нацелены на решение разноцелевых вопросов моделирования, анализа, в том числе синтеза динамических систем которые имеют непрерывные события (ДСДС), сейчас довольно широко развиваются, а также применяется сеть Петри. Сеть Петри в компактной структуре несет в себе принцип взаимоотношений между всеми элементами системы в целом, а также показатели изменения возможных состояний в случае установки начальных конкретных условий [17, 18].

При использовании системного анализа устанавливался порядок разработки системы управления очистными сооружениями, что предполагает построение 2-уровневой математической модели функционирования оборудования; на нижнем уровне биореактор

обеспечивает очищение хозяйственных стоков до максимально допустимого уровня содержания загрязняющих агентов (аналитическая модель), на верхнем уровне очистки осуществляется с использованием сетей Петри

(сетевые модели).

**Результаты и обсуждение.** На рисунке 1 представлен нижний уровень математической модели – аэрационный резервуар для очистки стоков животноводческого хозяйства:



1- резервуар; 2-сепаратор твердых и жидких отходов; 3- резервуар первичной седиментации; 4 анаэробный резервуар; 5- резервуар аэрации; 6- резервуар вторичной седиментации; 7- шламонакопитель

Рис. - Структурная схема очистки сточных вод животноводческих ферм

Классификация биохимических методик включает следующие категории:

1) методы аэробные, т.е. подразумевающие очистку в присутствии природного кислорода, что предполагает возможность применения как в антропогенной, так и в природной среде (например, с помощью биофильтра или искусственного водоёма);

2) методы анаэробные, т.е. очистка без присутствия атмосферного кислорода; применение таких методов оптимально при обработке производственных стоков и осадков с высоким содержанием загрязняющих агентов.

При использовании аэробных методов нет необходимости в значительных финансовых затратах, однако эксплуатационные издержки достаточно велики; применяются такие технологии и средства, как биофильтры, окисляющее оборудование, биологические пруды, аэротенки. При использовании анаэробных методов характеристики затрат противоположны.

На практике чаще всего применяются аэробные методы очистки стоков, к которым есть два основных подхода – первый опирается на воздействие объединений микроорганизмов, присутствующих в виде взвеси (активный ил), на загрязняющие агенты при обработке в аэротенках, что приводит к разрушению загрязнений, основу же второго подхода составляет воздействие микроорганизмов, расположенных на какой-либо поверхности, клетки которых прикреплены друг к другу (биоплёнки).

Очистка первого типа: в данном случае сточные воды очищаются от загрязняющих агентов с помощью активного ила, способного окислять и разрушать присутствующие в сточных водах органические примеси. Действующая в активном иле биологическая совокупность функционирует на нескольких уровнях, объединяемых по типу питания: 1) наиболее значимые для окисления и разрушения загрязняющих агентов гетеротрофные бактерии; 2) питающиеся бактериями простейшие (инфузории, коловратки, жгутиконосцы); 3) сосущие инфузории.

На каждом из перечисленных трофических уровней концентрация организмов определяется целым рядом факторов – условиями протекания процессов, химической структурой стоков, рН-фактором, содержанием растворенного кислорода. Следует отметить, что простейшие второго и третьего уровней выполняют промежуточные функции, принимая в разрушении загрязнений опосредованное участие за счёт поглощения бактериальных клеток, образуемых в результате ферментативного окисления органических загрязняющих веществ.

Образование бактериальных клеток становится возможным за счёт присутствия в загрязнении органического углерода и процессов окисления, обеспечивающих энергию синтеза. Сопровождающие синтез биохимические процессы в клетках чрезвычайно сложны и разнообразны, что обуславливает практическую невозможность их сведения к формализованным образцам, на основе которых строится математическая модель; в силу этого подобные процессы моделируются лишь обобщённо.

Совокупная жизнедеятельность входящих в состав активного ила организмов (биоценоз) включает гетеротрофные микроорганизмы, классифицируемые по физиологическим признакам и объединяемые способностью использовать для своего функционирования входящий в определённые органические вещества углерод. Органические соединения могут выступать в качестве углеродного источника для биоценоза активного ила только при определённых условиях, причём соединения с различными характеристиками могут существенно отличаться сроками окисления за счёт воздействия гетеротрофных бактерий.

Органические суспензии, в соответствии с признаком разобщённости системы, относятся к микрогетерогенной категории. В качестве первичных частиц системы выступают в данном случае дисперсные бактерии с параметрами  $10^2 - 10^4$  нм; при наличии благоприятных условий на этой основе образуются в дальнейшем хлопья активного ила, достигающие

$10^{-3}$  см и более. Поскольку у целого ряда входящих в состав суспензии организмов имеется способность образовывать полипептиды и иные внеклеточные полимеры, а также выделять их в среду обитания, начинается активный процесс образования хлопьев (флокул), суспензия эффективно отделяется от воды, прошедшей процедуру очистки. Способность биоценоза активного ила к флокуляции определяется целым рядом факторов – собственно видом микроорганизмов, возрастом клеток, температурой и структурой среды обитания. Следует отметить, что флокуляция способствует разделению фаз после процедуры очистки, хотя у отдельных дисперсных частиц существенно выше активность в ходе воздействия. Вместе с тем, на практике от величины флокул зависит лимитирующая фазабиочистки.

Активный ил, как свидетельствуют результаты исследований, характеризуется наличием значительной поверхности (до 100 кв. м на 1 г сухого вещества), что обуславливает наличие способности к связыванию существенного объёма жидкости [17, 18] и тенденции к слипанию с твёрдыми суспендированными соединениями.

Оксидирование флокулами активного ила органических соединений, содержащихся в подлежащих очистке стоках – не что иное как каталитическая гетерогенная реакция. В данном случае в разнородной среде непрерывная фаза представлена стоками, содержащими органические соединения, дискретная же – отдельными дисперсными частицами и хлопьями. В этом случае должны присутствовать следующие этапы химической реакции: 1) перенос агента к поверхности и внутрь хлопьев, к ферментам, представляющим собой центры катализа; 2) биохимическое преобразование; 3) отвод от активных центров продуктов реакции. Таким образом, скорость процесса (как и в случае с любой другой аналогичной реакцией) зависит от того, протекает ли он в диффузионной или кинетической области.

Факторами, определяющими качественные и количественные закономерности образования рассматриваемой биологической системы, являются: используемые технологии очистки; условия функционирования очистных сооружений; химическая структура подлежащих очистке стоков; уровень содержания загрязнений.

Интенсивность оксидирования загрязнений активным илом зависит, в свою очередь, от условий его функционирования, предопределяемых применяемыми технологиями, спецификой конструкции очистных сооружений и т.д.

Очистка второго типа: в данном случае существенную роль играет иммобилизованная микрофлора.

Биохимические методы являются одним из наиболее эффективных способов очистки

сточных вод от загрязнений. Они основаны на использовании живых организмов, таких как бактерии, грибы и водоросли, для разложения органических веществ в сточной воде. В зависимости от наличия кислорода воздуха, биохимические методы подразделяются на две группы: аэробные и анаэробные. Аэробные методы проводятся в присутствии кислорода воздуха и могут осуществляться как в естественных условиях, например, в биологических прудах, так и в искусственных условиях, например, в биоскрубберах и биофильтрах. В таких методах бактерии используют кислород для разложения органических веществ в сточной воде, что приводит к их более полной очистке. Анаэробные методы, напротив, проводятся без кислорода воздуха и используются для очистки высококонцентрированных осадков и стоков промышленных сточных вод. В таких методах бактерии разлагают органические вещества без кислорода, что приводит к образованию биогаза, который может быть использован в качестве энергии. Обе группы биохимических методов имеют свои преимущества и недостатки, поэтому выбор метода зависит от конкретных условий и требований к очистке сточных вод. Однако, в целом, биохимические методы являются эффективным и экологически безопасным способом очистки сточных вод.

Режим культивирования микроорганизмов может быть как непрерывным, так и повременным; данные режимы используются в открытых и закрытых системах, соответственно.

Как правило, при использовании периодического режима микроорганизмы вносятся в питательную среду, после чего рост их продолжается вплоть до истощения того или иного из составляющих её компонентов. Распределение по времени динамики числа клеток описывается с помощью специальных графиков – «кривых роста».

Достаточно сложны кинетические «кривые роста» при использовании повременного режима культивирования; в данном случае могут быть выделены следующие этапы (фазы):

1) в большинстве случаев после введения инокулята наступает лаг-фаза или период индукции, характеризующийся минимальной клеточной динамикой на фоне образования ферментов, активации синтеза белка, преобразования процессов клеточного метаболизма;

2) экспоненциальный рост – рывковое накопление биомассы и продуктов различных биохимических реакций;

3) замедленный рост – динамика минимизируется на короткий срок;

4) стационарная фаза – развитие приобретает постоянный характер, общее число клеток неизменно (клетки постоянно отмирают и практически сразу возмещаются за счёт прироста биомассы);

5) фаза отмирания (нулевой прирост биомассы) – возникает в случае истощения системы по субстрату либо при накоплении

существенного объёма продуктов реакций, замедляющих рост.

При наступлении этапа экспоненциального роста скорость деления клеток достигает максимума, определяемого средовыми факторами и типом микроорганизмов. На данном этапе у многих бактерий также неизменными остаются размеры клеток и концентрация белка; таким образом, клетки, формирующие бактериальную культуру, могут быть определены как «стандартные». Ввиду этого именно на данном этапе представляется целесообразным определять показатель скорости роста, т.е. клеточного деления. Кроме того, показатели роста именно в экспоненциальной фазе служат основой для исследования воздействия средовых факторов (температуры, аэрации, уровня pH и пр.).

По итогам опытного исследования закономерностей развития микроорганизмов было определено:

1) Численная динамика микроорганизмов в экспоненциальной фазе линейно связана с содержанием клеток в системе:

$$\frac{dB}{dt} = mB \quad (1)$$

где  $B$  - число клеток;  
 $m$  - коэффициент пропорциональности, получивший название удельной скорости роста.

В экспоненциальной фазе удельная скорость роста постоянна и равна максимальной:  $m = m_{\max} = \text{const}$ , следовательно:

$$\frac{dB}{dt} = m_{\max} B \quad B(t) = B_0 e^{m_{\max} t} \quad (2)$$

-описывает рост микроорганизмов в экспоненциальной фазе.

Особенностью кинетики микробиологических процессов является зависимость скорости роста культуры микроорганизмов от одного или нескольких компонентов среды, обеспечивающих биосинтетическую основу метаболизма клеток и получивших название лимитирующих субстратов. В простейшем случае это отношение может быть выражено линейной зависимостью:  $m(S) = k \cdot S$ , где  $S$  - концентрация лимитирующего субстрата.

Однако в практике моделирования микробиологических процессов [17] чаще используется другая форма зависимости между удельной скоростью роста и концентрацией субстрата. Она имеет вид:

$$m = \frac{m_{\max} S}{K_s + S} \quad (3)$$

$m_{\max}$  - предельная максимальная удельная скорость роста;

$K_s$  - параметр, получивший название константы сродства субстрата к микроорганизму;  $K_s$  численно равна концентрации субстрата, при которой удельная скорость

роста равна половине максимальной скорости роста  $m_{\max}$ . Указанная зависимость (сформулированная Моно) относится к эмпирическим; в то же время можно привести и кинетическое обоснование уравнения – основой для его формирования могут быть результаты кинетического анализа развития популяции микроорганизмов по простейшей кинетической схеме, состоящей из 2-х этапов.

Линейная фаза, которой предшествует фаза экспоненциальная, сменяется фазой замедления. Развитие популяции в случае повременного культивирования достигает определённого максимального уровня и останавливается; указанный уровень можно обозначить как  $B_m$  (предельное содержание клеток). Расход лимитирующего субстрата рассматривается в качестве одного из основных факторов, влияние которых обуславливает переход к фазе замедления развития. Ранее рассматривалась предложенная Моно элементарная модель развития популяции микроорганизмов, состоящая из 2-х этапов и обуславливающая корреляцию между концентрацией субстрата и скоростью роста.

При применении данной формулы описание динамики компонентов системы составляется с помощью следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dt} &= \frac{m_{\max} SB}{K_s + S} \\ \frac{dS}{dt} &= -\frac{1}{Y_s} \frac{m_{\max} SB}{K_s + S} \end{aligned} \quad (4)$$

Это модель Моно, знак минус во втором уравнении указывает, что процесс идет с уменьшением субстрата.

$Y_s$  - коэффициент пропорциональности, связывающий количество образовавшейся биомассы и количество израсходованного за это время субстрата:  $B - B_0 = Y_s(S_0 - S)$ , получил название экономического коэффициента (по субстрату).

Данная модель справедлива для всех механизмов роста, характеризующих многостадийностью превращения субстрата при отсутствии усложняющих факторов, таких, как ингибирование избытком субстрата или продуктом ферментативных превращений.

Ингибирование или активация роста популяции микроорганизмов - широко распространенное явление, в большом числе случаев определяющее скорость развития культуры.

Можно выделить следующие типы воздействия: ингибиторы, действующие на синтез ДНК; ингибиторы, действующие на РНК; ингибиторы синтеза белка; ингибиторы синтеза полимеров бактериальной клеточной стенки; мембрано - активные вещества; ингибиторы энергетических процессов; ингибиторы лимитирующего фермента.

По кинетическому механизму действия

можно выделить следующие основные классы ингибиторов: необратимые ингибиторы - вещества необратимо взаимодействующие с компонентами растущей микробной клетки. Кинетика их действия описывается уравнением:

$$\frac{dBI}{dt} = kBI \quad (5)$$

что соответствует кинетической схеме:  $V + I \xrightarrow{k} VI$ , где

$V$  - число клеток;

$I$  - концентрация ингибитора;

$VI$  - число заингибированных клеток;

$k$  - константа скорости.

Процесс обратимого ингибирования можно описать схемой:  $V + I \xrightleftharpoons{k} VI$ ,

где  $k$  - эффективная константа равновесия.

Ингибирование избытком субстрата. В этом случае субстрат, который при относительно низких концентрациях увеличивает скорость роста, при более высоких концентрациях может быть эффективным ингибитором роста микроорганизмов. Активаторами называют соединения, которые, не будучи необходимыми для роста, могут заметно увеличивать максимальную скорость роста культур микроорганизмов.

Действие обратимых эффекторов на кинетику роста микроорганизмов:

$$m = \frac{m_{\max} (\alpha K_R + \beta R) S}{\alpha K_S (K_R + R) + S} \quad (6)$$

1) Полное конкурентное ингибирование ( $\alpha \rightarrow \infty, \beta = 0$ ).

В этом случае удельная скорость роста в экспоненциальной фазе определяется выражением:

$$m = \frac{m_{\max} S}{K_S \left( 1 + \frac{R}{K_R} \right) + S} \quad (7)$$

2) Полное неконкурентное ингибирование:

$$m = \frac{m_{\max} S}{\left( 1 + \frac{R}{K_R} \right) (K_S + S)} \quad (8)$$

3) Неконкурентная активация ( $\alpha = 1, \beta > 1$ ):

$$m = \frac{m_{\max} (K_R + \beta R) S}{K_R + R} \quad (9)$$

Влияние  $pH$  на кинетику роста микроорганизмов.

Содержание ионов  $H$  входит в число наиболее значимых факторов, влияющих на скорость развития микробной популяции.

Условием развития целого ряда организмов является поддержание значений  $pH$  в довольно узких рамках, причём снижение интенсивности процесса или полная его остановка могут быть спровоцированы как понижением, так и повышением значений  $pH$ .

При разных показателях  $pH$  в качестве наиболее значимого фактора, влияющего на кинетические показатели микробной популяции, выступает корреляция между уровнем  $pH$  и кинетической деятельностью ферментов, определяющая, в первую очередь, рост фермента. Зависимость скорости развития популяции от указанного показателя может быть выражена следующим уравнением:

$$m = \frac{m_{\max} S}{1 + \frac{H^+}{K_a} + \frac{K_b}{H^+}} \quad (10)$$

$H^+$  - концентрация ионов водорода. Это уравнение соответствует классическому уравнению роста микроорганизмов, в котором удельная скорость роста и константа полунасыщения зависят от концентрации ионов водорода следующим образом:

$$m_{\max}^{\text{каж}} = \frac{m_{\max}}{1 + \frac{H^+}{K_a} + \frac{K_b}{H^+}}$$

$$K_S^{\text{каж}} = K_S \frac{1 + \frac{H^+}{K_a} + \frac{K_b}{H^+}}{1 + \frac{H^+}{K_a} + \frac{K_b}{H^+}} \quad (11)$$

На практике широко распространён случай, когда субстрат, связываясь с ферментом, не изменяет значений констант диссоциации ионогенных групп лимитирующего фермента ( $K_a = K_a', K_b = K_b'$ ), в этом случае:

$$m = \frac{m_{\max} S}{K_a + S} \quad (12)$$

Такое уравнение даёт колоколообразный график зависимости удельной скорости роста культуры от концентрации ионов водорода. Константы ингибирования ионами водорода  $K_a$  и  $K_b$  описывают процесс соответственно в кислой и щелочной областях [17]. Для описания сигмоидальной зависимости скорости роста от  $pH$  на практике обычно используют

уравнение:

$$m = \frac{\frac{m_{\max} S}{1 + \frac{H^+}{K_a}}}{K_S + S} \quad (13)$$

Принята следующая модель процесса биочистки в резервуаре аэрации.

Математическая модель процесса в зоне смешения записывается в виде модели идеального смешения:

$$\begin{aligned} V \frac{dB^{(1)}}{dt} &= (B^{(0)} - B^{(1)}) * \nu + q_B V \\ V \frac{dS^{(1)}}{dt} &= (S^{(0)} - S^{(1)}) * \nu - q_S V \end{aligned} \quad (14)$$

начальные условия:

$$B^{(0)} = const \quad (15)$$

$$S^{(0)} = const \quad (16)$$

где  $B^{(0)}$ ,  $B^{(1)}$  – концентрация микроорганизмов во входном потоке и в зоне смешения, соответственно;  $S^{(0)}$ ,  $S^{(1)}$  – концентрация субстрата во входном потоке и в зоне смешения;  $q_B$  – скорость роста микроорганизмов;  $q_S$  – скорость окисления субстрата;  $V$  – объем зоны аппарата;  $\nu$  – объемная скорость потока.

Кинетические характеристики (параметры) процесса  $q_B$  и  $q_S$  определяются (рассчитываются) по эмпирическим соотношениям:

$$\begin{aligned} q_B &= \frac{m_{\max} SB}{(1 + H^+ / K_1 + K_2 / H^+) (K_S + S) \exp((t_{opt}^0 - t^0)^2 / d) (1 + C_{кам} / K_{кам1} + K_{кам2} / C_{кам})} - K_d B \\ q_S &= \frac{1}{Y_S} \frac{m_{\max} SB}{(1 + H^+ / K_1 + K_2 / H^+) (K_S + S) \exp((t_{opt}^0 - t^0)^2 / d) (1 + C_{кам} / K_{кам1} + K_{кам2} / C_{кам})} \end{aligned} \quad (17)$$

$m_{\max}$  – максимальная удельная скорость роста микроорганизмов;  $K_d$  – константа скорости отмирания микроорганизмов;  $Y_S$  – коэффициент по субстрату, связывающий количество биомассы и количество ушедшего на ее прирост субстрата (углеводородов);  $K_S$  – константа полунасыщения (константа сродства к субстрату);  $K_1$  и  $K_2$  – константы ингибирования ионами водорода;  $K_1$  описывает ингибирование в кислой области ( $H^+ \gg K_1$ );  $K_2$  описывает ингибирование в щелочной области ( $K_2 \gg H^+$ );  $H^+$  – концентрация ионов водорода;  $t_{opt}^0$  – значение температуры, оптимальное для развития микроорганизмов;  $t^0$  – текущая температура;  $d$  – температурный диапазон;  $C_{кам}$  – концентрация биокатализирующих соединений;  $K_{кам1}$  и  $K_{кам2}$  – эффективные константы ингибирования – активации в соответствующих областях,  $pK_1$  и  $pK_2$  – константы диссоциации.

Система уравнений, отражающая протекающие в зоне смешения процессы, решается с помощью метода Рунге-Кутты, в совокупности с кинетическими уравнениями биохимического преобразования.

Верхний уровень технологии очистки стоков животноводческого хозяйства рационально может быть описан с помощью модифицированных сетей Петри; в данном случае рекомендовано применение основанных на математическом аппарате сетей Петри N-схем. В данном случае одно из основных преимуществ состоит в наличии возможности представления сетевой модели в аналитическом и графическом форматах (в первом случае аналитический процесс автоматизируется, во втором – модель представлена предельно наглядно).

В данном случае одно из основных преимуществ состоит в наличии возможности представления сетевой модели в аналитическом и графическом форматах (в первом случае аналитический процесс автоматизируется, во втором – модель представлена предельно наглядно).

Таким образом, в рамках настоящего исследования была сформирована СП-модель технологического комплекса для очистки стоков животноводческого хозяйства. При реализации данной модели могут быть определены различные аспекты функционирования очистных сооружений при влиянии различных средовых факторов и различном уровне нагрузки. Кроме того, может быть проведен анализ алгоритмов управления.

В рамках исследования был разработан программный комплекс СУ для очистки стоков животноводческого хозяйства на основе SCADA – системы TRACE MODE 5. 10 [19].

**Выводы.** Оптимизация процессов очищения сточных вод на животноводческих фермах с использованием принципов систематического анализа – это необходимая и важная задача, которая требует комплексного подхода и внимания к деталям. Реализуя системный подход, фермеры и специалисты могут не только повысить эффективность работы своих предприятий, но и существенно снизить воздействие на окружающую среду. Следует отметить, что устойчивое развитие животноводства и охрана водных ресурсов должны идти рука об руку, чтобы обеспечить благополучие как для производственных процессов, так и для будущих поколений.

Для управления, анализа и прогнозирования развития внештатных ситуаций создана программная реализация системы очистки сточных вод животноводческих ферм, которая может эффективно использоваться в вопросах оптимизации процессов очищения сточных вод на животноводческих.

#### Литература

1. Шигапов И.И., Краснова О.Н., Симонов Г.А. Использование текстильных аэраторов для очистки сточных вод в животноводческих фермах // В сборнике: Инновационные достижения науки и техники АПК. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. 2019. С. 464-468.
2. Использование текстильных фильтров для очистки сточных вод в животноводческих фермах /

И.И. Шигапов, Б.Р. Ахмадов, О.Н. Краснова, Г.А. Симонов // В сборнике: Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения. Материалы X Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Ульяновск, 2020. С. 326-331.

3. Инновационное устройство для очистки сточных вод животноводческих ферм / И.И. Шигапов, Г.А. Симонов, Б.Р. Ахмадов, Ю.Р. Гирфанова, О.Н. Краснова // Сельский механизатор. 2021. № 2. С. 20-21.

4. Губейдуллин Х.Х., Шигапов И.И., Кадырова А.М. Технологии и технические средства для очистки сточных вод в животноводческих фермах // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения. 2014. № 1. С. 92-101.

5. Текстильные барботажные фильтры-аэраторы для очистки сточных вод на животноводческих фермах / И.И. Шигапов, Р.Н. Байгуллов, О.Н. Краснова, Б.Р. Ахмадов // Сельский механизатор. 2022. № 7. С. 20-21.

6. Инновационные методы и технические средства для очистки сточных вод в животноводческих фермах / И.И. Шигапов, О.Н. Краснова, Ю.В. Полякова, А.А. Кожанова, Н.С. Маланин // В сборнике: Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения. Материалы Национальной научно-практической конференции. В 2-х томах. 2019. С. 192-196.

7. Полякова Ю.В., Кожанова А.А., Маланин Н.С. Барботажные аэраторы для очистки сточных вод в животноводческих фермах // В сборнике: Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам. Сборник научных трудов по результатам работы IV международной молодежной научно-практической конференции. 2019. С. 262-267.

8. Использование текстильных фильтров для очистки сточных вод в животноводческих фермах / И.И. Шигапов, О.Н. Краснова, Н.С. Маланин, Ю.В. Полякова, А.А. Кожанова // В сборнике: Актуальные проблемы аграрной науки: состояние и тенденции развития. Материалы Национальной научно-практической конференции. 2019. С. 261-266.

9. Технические средства для очистки сточных вод в животноводческих фермах / И.И. Шигапов, О.Н. Краснова, Ю.В. Полякова, А.А. Кожанова, Н.С. Маланин // В сборнике: Актуальные проблемы аграрной науки: состояние и тенденции развития. Материалы Национальной научно-практической конференции. 2019. С. 276-282.

10. Салахова И.Ф., Хисамеева Л.Р. Проектирование систем водоотведения животноводческих ферм // В сборнике: Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения. Материалы X Национальной конференции с международным участием. Саратов, 2020. С. 187-190.

11. Иванов А.А. Решения по очистке навозных стоков животноводческих комплексов для снижения техногенной нагрузки на водные объекты // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 68-3. С. 44-47.

12. Губейдуллин Х.Х., Исайчев В.А., Шигапов И.И. Механическая и биологическая очистка животноводческих ферм с применением спирально-винтовых механизмов // Научный вестник Технологического института - филиала ФГБОУ ВПО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. 2013. № 11. С. 113-116.

13. Лопаева Н.Л. Очистка сточных вод на птицеводческих предприятиях // В книге: Теоретические, практические и безопасные аспекты ведения сельского хозяйства: Сборник тезисов круглого стола. 2021. С. 65-67.

14. Галингер И.О. Экологические проблемы свиноводства и пути их решения // В сборнике: Проблемы агроэкологии АПК Сибири. Сборник трудов Всероссийской с международным участием научно-практической конференции, посвященной 50-летию научной деятельности доктора сельскохозяйственных наук, профессора А.С. Моторина и 25-летию кафедры Экологии и рационального природопользования. Тюмень, 2023. С. 175-179.

15. Методы очистки и утилизации отходов животноводства / Х.Х. Тебеев, М.Х. Хуратижева, Т.А. Сасиков, И.М. Хамокова // В сборнике: экономические, биотехнико-технологические аспекты устойчивого сельского хозяйства в условиях цифровой трансформации. сборник научных трудов по итогам VII Международной научно-практической конференции памяти Б.Х. Жерукова. Нальчик, 2019. С. 153-157.

16. Ковалев А.А. Материальный и тепловой баланс системы очистки навозных стоков с применением компрессионного теплого насоса // Вестник ВИЭСХ. 2015. № 4 (21). С. 114-119.

17. Fesina E., Savdur S. Modeling of sewage bioremediation as a modified Petri net // World Applied Sciences Journal. 2014. Т. 31. № 6. С. 1191-1197.

18. Савдур С.Н. Моделирование системы очистки сточных вод животноводческих ферм на основе сетей Петри // Агробиотехнологии и цифровое земледелие. 2023. № 2 (6). С. 57-62.

19. Савдур С.Н. Моделирование системы очистки сточных вод животноводческих ферм на основе сетей Петри // В сборнике: Глобальные вызовы для продовольственной безопасности: риски и возможности. Научные труды международной научно-практической конференции. Казань, 2021. С. 446-454.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Финансирование работы отсутствует.

#### **Сведения об авторах:**

Савдур Светлана Николаевна - кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии, животноводства и химии, email: savdur.svetlana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3261-2154>

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

Воронцова Валерия Леонидовна - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей математики, email: milen99@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5736-0646>

Институт математики и механики им. Лобачевского, Казанского федерального университета, Казань, Россия

### **SYSTEMATIC ANALYSIS OF THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS OF LIVESTOCK FARMS**

**S. N. Savdur, V. L. Vorontsova**

**Abstract.** System analysis of the wastewater treatment process of livestock farms is an important stage in ensuring environmental safety and sustainable development of animal husbandry. The main objective of the work is to improve the efficiency of the wastewater treatment process of livestock farms based on system analysis. Wastewater generated on farms contains a high level of organic pollutants, pathogenic microorganisms and nutrients, which can significantly affect the quality of the environment. To solve this problem, an integrated approach was used, which included hydrological, biochemical and technological aspects. The possibility of introducing modern biotechnology is considered, which will significantly reduce the negative impact on the environment and increase the level of sustainability of livestock enterprises. Depending on the sources of pollution and the main pollutants, technical solutions were developed to reduce the volume of wastewater and purify it. The efficiency of their operation can be ensured with the help of modern methods of information processing, using methods of system analysis of complex objects based on a mathematical description of the technological process. A two-level system model was developed to study the patterns of operation of a bio-treatment device under condi-



tions of dynamically changing parameters of the technological process. To analyze the state of the treatment system as a whole and predict the development of emergency situations, a software implementation of a wastewater treatment system for livestock farms was created.

**Keywords:** agriculture, Petri nets, modified Petri nets.

**For citation:** Savdur S.N., Vorontsova V.L. Systematic analysis of the wastewater treatment process of livestock farms. *Agrobiotechnology and digital agriculture*. 2024; 4(12). 59-67 p.

**References**

1. Shigapov II, Krasnova ON, Simonov GA. [The use of textile aerators for wastewater treatment in livestock farms]. V sbornike: *Innovatsionnye dostizheniya nauki i tekhniki APK. Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2019; 464-468 p.
2. Shigapov II, Akhmadov BR, Krasnova ON, Simonov GA. [The use of textile filters for wastewater treatment in livestock farms]. V sbornike: *Agrarnaya nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya. Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 2-kh tomakh. Ulyanovsk*. 2020; 326-331 p.
3. Shigapov II, Simonov GA, Akhmadov BR, Girfanova YuR, Krasnova ON. [Innovative device for wastewater treatment of livestock farms]. *Selskiy mekhanizator*. 2021; 2. 20-21 p.
4. Gubeydullin KhKh, Shigapov II, Kadyrova AM. [Technologies and technical means for wastewater treatment on livestock farms]. *Nauka v sovremennykh usloviyakh: ot idei do vnedreniya*. 2014; 1. 92-101 p.
5. Shigapov II, Baygullov RN, Krasnova ON, Akhmadov BR. [Textile bubbling filters-aerators for wastewater treatment on livestock farms]. *Selskiy mekhanizator*. 2022; 7. 20-21 p.
6. Shigapov II, Krasnova ON, Polyakova YuV, Kozhanova AA, Malanin NS. [Innovative methods and technical means for wastewater treatment in livestock farms]. V sbornike: *Agrarnaya nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya. Materialy Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 2-kh tomakh*. 2019; 192-196 p.
7. Polyakova YuV, Kozhanova AA, Malanin NS. [Bubbling aerators for wastewater treatment in livestock farms]. V sbornike: *Molodye issledovateli agropromyshlennogo i lesnogo kompleksov – regionam. Sbornik nauchnykh trudov po rezul'tatam raboty IV mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2019; 262-267 p.
8. Shigapov II, Krasnova ON, Malanin NS, Polyakova YuV, Kozhanova AA. [The use of textile filters for wastewater treatment in livestock farms]. V sbornike: *Aktualnye problemy agrarnoy nauki: sostoyanie i tendentsii razvitiya. Materialy Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2019; 261-266 p.
9. Shigapov II, Krasnova ON, Polyakova YuV, Kozhanova AA, Malanin NS. [Technical means for wastewater treatment in livestock farms]. V sbornike: *Aktualnye problemy agrarnoy nauki: sostoyanie i tendentsii razvitiya. Materialy Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2019; 276-282 p.
10. Salakhova IF, Khisameeva LR. [Design of wastewater disposal systems for livestock farms]. V sbornike: *Sovremennyye problemy i perspektivy razvitiya stroitelstva, teplogazosnabzheniya i energoobespecheniya. Materialy X Natsionalnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Saratov*. 2020; 187-190 p.
11. Ivanov AA. [Solutions for the treatment of manure runoff from livestock complexes to reduce the technogenic load on water units]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2020; 68-3. 44-47 p.
12. Gubeydullin KhKh, Isaychev VA, Shigapov II. [Mechanical and biological treatment of livestock farms using spiral-screw mechanisms]. *Nauchnyy vestnik Tekhnologicheskogo instituta - filiala FGBOU VPO Ulyanovskaya GSKhA im.P.A.Stolypina*. 2013; 11. 113-116 p.
13. Lopaeva NL. [Wastewater treatment at poultry farms]. V knige: *Teoreticheskie, prakticheskie i bezopasnye aspekty vedeniya selskogo khozyaystva: Sbornik tezisov kruglogo stola*. 2021; 65-67 p.
14. Galinger IO. [Environmental problems of pig farming and ways to solve]. V sbornike: *Problemy agroekologii APK Sibiri. Sbornik trudov Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu nauchnoy deyatel'nosti doktora selskokhozyaystvennykh nauk, professora A.S.Motorina i 25-letiyu kafedry Ekologii i ratsionalnogo prirodopolzovaniya. Tyumen*. 2023; 175-179 p.
15. Tebuev KhKh, Khuratizheva MKh, Sasikov TA, Khamokova IM. [Methods of cleaning and disposal of livestock waste]. V sbornike: *ekonomicheskie, biotekhniko-tehnologicheskie aspekty ustoychivogo selskogo razvitiya v usloviyakh tsifrovoy transformatsii. Sbornik nauchnykh trudov po itogam VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii pamyati B.Kh.Zherukova. Nalchik*. 2019; 153-157 p.
16. Kovalev AA. [Material and thermal balance of the manure wastewater treatment system using a compression heat pump]. *Vestnik VIESKh*. 2015; 4 (21). 114-119 p.
17. Fesina E, Savdur S. Modeling of sewage bioremediation as a modified Petri net. *World Applied Sciences Journal*. 2014; Vol.31. 6. 1191-1197 p.
18. Savdur SN. [Modeling of wastewater treatment system of livestock farms based on Petri nets]. *Agrobiotekhnologii i tsifrovoye zemledelie*. 2023; 2 (6). 57-62 p.
19. Savdur SN. [Modeling of wastewater treatment system of livestock farms based on Petri nets]. V sbornike: *Globalnye vyzovy dlya prodovol'stvennoy bezopasnosti: riski i vozmozhnosti. Nauchnye trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kazan*. 2021; 446-454 p.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interest. There was no funding for the.

**Authors:**

Savdur Svetlana Nikolaevna – Ph.D. in Engineering, Associate Professor of the Department of Biotechnology, Animal Husbandry and Chemistry, email: savdur.svetlana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3261-2154>  
Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.

Vorontsova Valeriya Leonidovna - Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of General Mathematics, email: milen99@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5736-0646>  
Lobachevsky Institute of Mathematics and Mechanics, Kazan Federal University, Kazan, Russia.