

УДК 628.3:663.4:519.87

Релькина Валерия Алексеевна,
Магистрант, Волгоградский ГАУ

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА И ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ПРИ ВНУТРИПОЧВЕННОЙ УТИЛИЗАЦИИ СТОКОВ ПИВОВАРЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки экологически безопасных и экономически эффективных методов утилизации сточных вод пивоваренной промышленности. Данный вид стоков характеризуется высокими концентрациями органических соединений, соединений азота, калия, а также наличием взвешенных веществ, включая остаточные дрожжи и кизельгур. Технология внутрипочвенной утилизации, основанная на естественной ассимиляционной способности почвенных микроорганизмов, является перспективным направлением, однако сопряжена с рисками загрязнения почв и грунтовых вод.

Ключевые слова: Цифровое моделирование, влагоперенос, миграция загрязнителей, пивоваренные стоки, внутрипочвенная утилизация, ненасыщенная зона, сорбция, биохимическая деструкция, машинное обучение.

Пивоваренная отрасль относится к числу наиболее водоемких секторов пищевой промышленности. На производство одного литра пива расходуется от четырех до десяти литров воды, при этом объем образующихся сточных вод пропорционален объему выпускаемой продукции. Состав сточных вод пивоваренных заводов отличается высокой неравномерностью как по количеству, так и по качественным показателям в зависимости от технологического цикла. Основными загрязняющими компонентами являются растворенные органические вещества сахара, белки, спирты, органические кислоты, азотсодержащие соединения, калий, фосфор, а также взвешенные вещества остаточные дрожжи, частицы солода и фильтровальных материалов.

Традиционные методы водоотведения и очистки предполагают сброс стоков в централизованные системы канализации с последующей обработкой на городских очистных сооружениях либо строительство локальных очистных сооружений, включающих механическую, физико-химическую и биологическую очистку. Оба подхода связаны с существенными капитальными и эксплуатационными затратами. Альтернативой выступает внутрипочвенная утилизация технология, при которой предварительно осветленные стоки подаются на специально подготовленные почвенные участки или фильтрующие траншеи, где под действием гравитационных сил происходит их инфильтрация в толщу почвогрунта. Почвенная толща в данном случае рассматривается как биогеохимический барьер, обеспечивающий сорбцию, трансформацию и деструкцию загрязняющих веществ.

Однако практика применения внутрипочвенных методов утилизации высококонцентрированных стоков выявила ряд проблем. Основными рисками являются снижение фильтрационной способности почв вследствие коагматажа порового пространства взвешенными веществами и продуктами микробиологического синтеза, накопление биогенных элементов, прежде всего азота и калия, в почвенном профиле, а также возможность их выноса в грунтовые воды. Управление данными рисками требует разработки прогнозных инструментов, позволяющих оценивать поведение системы влагопереноса и массопереноса во времени и пространстве. Наиболее эффективным инструментом такого прогноза является цифровое математическое моделирование.

Современное состояние проблемы и постановка задач исследования. Анализ доступной научной литературы показывает, что, несмотря на обширный опыт математического моделирования влагопереноса в почвах, а также миграции различных классов загрязняющих веществ, работы, непосредственно посвященные моделированию процессов при



внутрипочвенной утилизации стоков пивоваренного производства, отсутствуют. Имеющиеся исследования можно разделить на три группы. К первой группе относятся фундаментальные работы в области физики почв и гидрогеологии, посвященные движению влаги в ненасыщенных средах, которые заложили теоретическую базу для описания процессов инфильтрации и перераспределения влаги. Вторая группа включает исследования по моделированию переноса растворенных веществ, преимущественно для условий сельскохозяйственного использования почв при внесении минеральных и органических удобрений, а также пестицидов. Третья группа работ посвящена миграции загрязнителей от специфических источников, таких как полигоны твердых бытовых отходов, навозохранилища, иловые площадки очистных сооружений.

Теоретические основы и концептуальная модель. Концептуальная модель рассматривает почвенный профиль как пористую многофазную среду, состоящую из твердой фазы минеральные и органические компоненты, жидкой фазы почвенный раствор и газообразной фазы почвенный воздух. Процесс внутрипочвенной утилизации представляется как совокупность взаимосвязанных физических, физико-химических и биохимических процессов, протекающих при поступлении жидкости на поверхность почвы и последующем ее движении вниз под действием силы тяжести и градиента потенциала почвенной влаги.

Основой гидродинамической части модели является описание движения влаги в ненасыщенных условиях. В отличие от насыщенных сред, где фильтрация подчиняется линейному закону Дарси, в ненасыщенной зоне гидравлическая проводимость почвы не является постоянной величиной, а резко снижается по мере уменьшения влажности. Кроме того, связь между влажностью и капиллярным давлением, а также между влажностью и проводимостью носит существенно нелинейный характер. Классическим подходом к описанию таких процессов является использование нелинейного дифференциального уравнения в частных производных, известного как уравнение Ричардса, которое в одномерном вертикальном варианте описывает изменение капиллярного потенциала во времени и по глубине профиля. Для замыкания этого уравнения необходимы функциональные зависимости, связывающие влажность, капиллярный потенциал и гидравлическую проводимость. В мировой практике наибольшее распространение получила параметризация Муалема-ван Генухтена, которая описывает основную гидрофизическую характеристику и функцию проводимости через ограниченный набор эмпирических параметров.

Применительно к почвам, используемым для внутрипочвенной утилизации, важно учитывать их структурную организацию. Многие почвы, особенно окультуренные, обладают двойной пористостью: поровое пространство подразделяется на систему крупных межагрегатных пор макропор и систему мелких внутриагрегатных пор. Макропоры обеспечивают быстрый транзитный поток влаги и растворенных веществ, тогда как внутриагрегатная влага находится в относительно неподвижном состоянии.

Описание переноса растворенных химических веществ базируется на уравнении конвективно-дисперсионного переноса. Данное уравнение учитывает три механизма перемещения вещества: конвективный перенос вместе с движущимся потоком влаги, гидродинамическую дисперсию, обусловленную неравномерностью скоростей течения в порах и молекулярной диффузией, а также источниковые и стоковые члены, описывающие взаимодействие вещества с твердой фазой почвы и его трансформацию. Взаимодействие с твердой фазой сорбция описывается изотермами равновесной сорбции. Для большинства загрязнителей пивоваренных стоков характерна различная сорбционная способность.

Важнейшей особенностью пивоваренных стоков, отличающей их от, например, минерализованных дренажных вод, является высокая концентрация биоразлагаемого органического вещества. Поступление легкоусвояемого органического субстрата в почву инициирует вспышку численности и активности почвенных микроорганизмов, которые используют органическое вещество как источник энергии и углерода. В процессе аэробного дыхания органическое вещество окисляется до углекислого газа и воды. Скорость этого процесса описывается кинетикой первого порядка, то есть пропорциональна концентрации



субстрата. Интенсивность биохимической деструкции существенно зависит от температуры почвы, влажности и доступности кислорода. При высоких нагрузках по органике и ограниченной аэрации в почве могут формироваться анаэробные зоны, что изменяет направленность микробиологических процессов.

Отдельного рассмотрения требует поведение соединений азота. В стоках пивоварения азот присутствует преимущественно в форме аммония, а также в составе органических соединений. В почве под действием микроорганизмов-нитрификаторов аммоний окисляется сначала до нитритов, затем до нитратов. Нитраты чрезвычайно подвижны и представляют основную угрозу для грунтовых вод. Одновременно в почве протекает процесс денитрификации восстановления нитратов до газообразных форм в анаэробных условиях. Для адекватного моделирования необходимо рассматривать цепочку последовательных превращений: минерализация органического азота до аммония, нитрификация аммония, сорбция аммония, денитрификация нитратов.

Цифровая реализация и методы параметризации. Численная реализация разработанной модели осуществляется методом конечных разностей. Уравнение влагопереноса является нелинейным, что обусловлено зависимостью влагоемкости и проводимости от искомой функции давления.

Разработанный алгоритм может быть реализован как в специализированных программных пакетах, ориентированных на решение задач гидрогеологии и почвенной гидрофизики, например, HYDRUS-1D, так и в универсальных вычислительных средах, позволяющих создавать авторские коды. Существуют также отечественные разработки, такие как программа Почва 2D, предназначенная для решения связанных задач тепло- и влагопереноса. Выбор инструмента реализации определяется конкретными задачами исследования и квалификацией пользователя.

Наиболее сложной и критически значимой проблемой при практическом применении модели является ее параметрическое обеспечение. Для задания гидрофизических характеристик почвы параметров модели ван Генухтена, коэффициента фильтрации, коэффициента гидродинамической дисперсии требуются прямые лабораторные или полевые измерения, которые зачастую отсутствуют. В этих условиях общепризнанным подходом является использование педотрансферных функций эмпирических регрессионных уравнений, связывающих искомые гидрофизические параметры с доступными данными почвенных обследований гранулометрическим составом, плотностью сложения, содержанием гумуса. Разработаны многочисленные региональные и глобальные педотрансферные функции, однако их точность существенно варьируется и применимость для конкретного объекта требует проверки.

В последние годы активно развивается альтернативное направление, основанное на применении методов искусственного интеллекта, прежде всего искусственных нейронных сетей. Нейросетевые модели способны выявлять сложные нелинейные зависимости между физико-химическими свойствами почв и их гидрологическими константами. При наличии достаточного объема обучающей выборки нейросетевые прогнозы параметров влагопереноса демонстрируют более высокую точность по сравнению с традиционными педотрансферными функциями.

Результаты вычислительных экспериментов. С целью апробации разработанной модели серия вычислительных экспериментов была выполнена для типичного сценария внутрипочвенной утилизации. Рассматривался суглинистый почвенный профиль мощностью 200 сантиметров с уровнем грунтовых вод на глубине 250 сантиметров. Верхнее граничное условие задавалось в виде постоянного потока влаги, соответствующего среднесуточной норме подачи стоков, и потока вещества с постоянной концентрацией органического загрязнителя и аммонийного азота. Продолжительность имитационного периода составляла 30 суток непрерывной подачи.

Анализ полученных полей влажности показал, что фронт увлажнения продвигается вглубь профиля неравномерно. В первые сутки формируется зона полного насыщения в



приповерхностном слое мощностью 5-10 сантиметров, что связано с превышением интенсивности подачи над величиной впитывания. В дальнейшем, по мере увеличения градиента потенциала, скорость впитывания возрастает и фронт влажности смещается вниз. К 20 суткам глубина промачивания достигает 150 сантиметров.

Принципиально иная картина наблюдалась для нитратного азота. Поскольку исходные стоки содержат преимущественно аммонийный азот, непосредственно после поступления раствора в почву нитраты отсутствовали. Однако спустя 7-10 суток в средней части профиля на глубинах 40-70 сантиметров начал фиксироваться рост концентраций нитратов, обусловленный протеканием процессов нитрификации. Максимум содержания нитратов наблюдался с временной задержкой в 10-15 суток относительно момента внесения. Нитраты, обладая высокой подвижностью, начали смещаться вниз с потоком влаги, формируя протяженный шлейф. При достижении нижней границы расчетной области создается реальная угроза поступления нитратов в грунтовые воды.

Моделирование деструкции органического вещества показало, что в условиях интенсивной аэрации верхнего слоя скорость разложения органики максимальна и достигает десятков процентов в сутки. Однако по мере насыщения влагой свободное поровое пространство сокращается, доступ кислорода лимитируется, и скорость деструкции падает. В приповерхностном слое формируется анаэробная зона, где окисление органического вещества замедляется и частично сменяется анаэробными процессами, вплоть до метаногенеза. Снижение окислительно-восстановительного потенциала, в свою очередь, может влиять на формы миграции азота и тяжелых металлов.

Особый интерес представляют результаты моделирования, учитывающие эффект кольматажа. При поступлении стоков, содержащих взвешенные вещества, в поверхностном слое почвы происходит задержание взвешенных частиц, что выражается в необратимом снижении гидравлической проводимости. Моделирование показало, что уже через 15-20 суток непрерывной подачи стоков без предварительного осветления коэффициент фильтрации верхнего слоя может снизиться в 3-5 раз. Это приводит к резкому замедлению инфильтрации, образованию поверхностного слоя жидкости и риску бокового растекания стоков за пределы утилизационного участка. Данный фактор необходимо учитывать при проектировании режимов подачи стоков и обязательном включении стадии предварительного отстаивания или фильтрации.

Разработанная модель, несмотря на принятые допущения, позволяет с приемлемой для инженерных расчетов точностью воспроизводить основные закономерности влагопереноса и массопереноса в почвенном профиле при утилизации пивоваренных стоков. Полученные результаты качественно согласуются с данными натурных наблюдений на действующих объектах почвенной утилизации и с результатами модельных экспериментов, выполненных для других типов органических стоков.

Дальнейшее развитие модели видится в нескольких направлениях. Первое направление связано с переходом от одномерных к двумерным и трехмерным постановкам задачи. Второе направление предполагает расширение спектра моделируемых компонентов. Помимо традиционных органического вещества, азота и калия, стоки пивоварения могут содержать специфические микрополлютанты, остаточные количества моющих и дезинфицирующих средств, которые также представляют экологическую опасность. Третье направление заключается в интеграции разработанной гидродинамической модели с моделями роста и развития сельскохозяйственных культур. Поскольку внутрипочвенная утилизация часто рассматривается как способ орошения и удобрения одновременно, важно оценивать не только экологический, но и агрономический эффект от применения стоков.

Ключевым направлением, отвечающим современным тенденциям цифровизации природопользования, является создание цифровых двойников систем внутрипочвенной утилизации. Цифровой двойник представляет собой динамически обновляемую виртуальную копию физического объекта, включающую математическую модель, контуар обратной связи с датчиками реального времени и блок принятия решений. Оснащение участков утилизации



датчиками влажности, температуры, электропроводности, концентраций нитратов позволит в режиме реального времени калибровать модель и осуществлять краткосрочный прогноз состояния системы. При отклонении прогнозных параметров от допустимых диапазонов система автоматически корректирует режимы подачи стоков или выдает рекомендации оператору. Такой подход способен минимизировать риски загрязнения окружающей среды и максимизировать утилизационный потенциал почв.

В настоящей работе впервые предложена и обоснована концепция цифрового моделирования влагопереноса и миграции загрязняющих веществ применительно к специфическому объекту почвенной утилизации стокам пивоваренного производства. Содержательно новизна исследования заключается в адаптации известных физико-математических моделей ненасыщенной фильтрации и конвективно-дисперсионного переноса с учетом блока биохимической трансформации органического вещества и азота, а также двухдоменного строения порового пространства. Методически новым является обоснование целесообразности применения гибридной параметризации моделей, сочетающей педотрансферные функции и нейросетевые технологии для преодоления проблемы дефицита входных данных.

Практическая значимость работы заключается в создании методологической основы для разработки нормативной базы проектирования систем внутрпочвенной утилизации отходов пищевой промышленности, а также в создании прототипа цифрового инструмента, пригодного для использования в проектных организациях и экологических службах пивоваренных предприятий. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением размерности модели, углублением блока биохимических превращений и реализацией концепции цифрового двойника на реальном объекте утилизации

Список литературы:

1. Кундас, С.П. Моделирование процессов термовлагопереноса в капиллярно-пористых средах / С.П. Кундас, Н.Н. Гринчик, И.А. Гишкелюк, А.Л. Адамович. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2007. – 291 с.
2. Бобарыкин, Н.Д. Моделирование процесса влагообмена в зоне аэрации на основе уравнения капиллярного потенциала / Н.Д. Бобарыкин // Инженерно-физический журнал. – 2007. – Т. 80, № 3. – С. 97.
3. Колова, А.Ф. Локальная очистка сточных вод пивоваренных предприятий / А.Ф. Колова, Т.Я. Пазенко, Е.М. Чудинова // Водоочистка. – 2013. – № 7. – С. 8-13.
4. Салугин, А.Н. Исследование вертикального переноса влаги в лизиметрах: масштабирование гидрофизических характеристик / А.Н. Салугин, Р.Н. Балкушкин // Почвоведение. – 2023. – № 12. – С. 1644-1653.
5. Савдур, С.Н. Моделирование системы очистки сточных вод предприятия пивоваренной промышленности / С.Н. Савдур // Научный аспект. – 2024. – № 1. – УДК 628.35:663.41.
6. Нысанов, Е.А. Моделирование и расчет распространения влаги с учетом характеристик почвы / Е.А. Нысанов, Ж.С. Кемельбекова, А.Х. Махатова, А.Е. Кожабекова, Д.У. Ыдырысбаев // Вестник НАОК. – 2025. – УДК 004.9:519.8 (075.8). – DOI: 10.47533/2025.1606-146X.3-18.
7. Tang, D.W. Reactive contaminant infiltration under dynamic preferential flow: effects of soil heterogeneity and transient flow on biodegradation / D.W. Tang, S.E.A.T.M. van der Zee // Journal of Hydrology. – 2024. – Vol. 634. – Article 131039. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131039

