

Подходы к численному моделированию работы биореакторов анаэробного сбраживания: обзор

Рубцов А.А.¹, (✉) Немущенко Д.А.²

¹Кемеровский государственный университет
Кемерово, Россия

²Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия
(✉) e-mail: nemuschenko@corp.nstu.ru

С интенсивным развитием сельского хозяйства активно проявляются неблагоприятные экологические последствия. В частности, на решение проблем животноводческих комплексов в некоторых регионах Российской Федерации выделяются значительные финансовые ресурсы. В работе сделан обзор подходов к численному моделированию процессов, протекающих при анаэробном сбраживании и имеющих своей целью получение биогаза (метана) и органического удобрения. В последние годы наблюдается рост интереса среди зарубежных и российских ученых к проблеме моделирования технологического процесса биореакторов в связи с развитием вычислительных мощностей и возможностей учета в модели факторов, влияющих на эффективность сбраживания, – повышения выхода биогаза или качества удобрения. Выявлены тенденции и недостатки отдельных направлений, а также подходы, позволяющие учитывать биохимические процессы в объеме реактора и на поверхности частиц субстрата. Показана актуальность поиска способов оценки динамики численности и факторов, от которых зависит многообразие микробиологических консорциумов. Наиболее перспективными для практического применения при производстве биоудобрения следует считать модели, основанные на машинном обучении. Они позволяют прогнозировать развитие микробиологических сообществ, прошедшие верификацию на полупромышленных экспериментальных данных в условиях сбраживания конкретных субстратов, а также численные модели и программные средства, включающие расчет гидродинамических параметров, поля температур при перемешивании и подаче новой порции субстрата в реактор и некоторые наиболее важные биохимические процессы, приводящие к образованию лимитирующих продуктов стадий ацидогенеза и ацетогенеза. На основе полученного массива информации формулировались задачи численного моделирования условий перемешивания в реакторах действующего комплекса.

Ключевые слова: численное моделирование, анаэробное сбраживание, режим перемешивания, органическое удобрение, отходы животноводства, утилизация отходов, ферментер

Approaches to numerical modeling of anaerobic digestion bioreactor operation: a review

Rubcov A.A.¹, (✉) Nemuschenko D.A.²

¹Kemerovo State University
Kemerovo, Russia

²Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia
(✉) e-mail: nemuschenko@corp.nstu.ru

With the intensive development of agriculture, unfavorable environmental effects are actively manifesting themselves. In particular, significant financial resources are allocated to solve the problems of livestock complexes in some regions of the Russian Federation. The paper provides an overview of the approaches to numerical modeling of processes occurring during anaerobic fermentation and aimed at obtaining biogas (methane) and organic fertilizer. In recent years, there has been an increase in the interest among foreign and Russian scientists in the problem of modeling the technological process of bioreactors due to the development of computing power and the ability to take into account in the model the factors affecting the efficiency of fermentation, increasing the yield of biogas or the quality of fertilizer. The trends and shortcomings of individual areas, as well as approaches that allow taking

into account biochemical processes in the reactor volume and on the surface of substrate particles, are identified. The relevance of searching for methods for assessing the dynamics of the number and the factors on which the diversity of microbiological consortia depends is shown. The most promising for practical application in the production of biofertilizers should be considered the models based on machine learning and allowing to predict the development of microbiological communities, verified on semi-industrial experimental data under the conditions of fermentation of specific substrates, as well as numerical models and software tools, including the calculation of hydrodynamic parameters, temperature fields during mixing and feeding a new portion of the substrate into the reactor and some of the most important biochemical processes leading to the formation of limiting products of the acidogenesis and acetogenesis stages. Based on the obtained array of information, the problems of numerical modeling of mixing conditions in the reactors of the operating complex were formulated.

Keywords: numerical modeling, anaerobic digestion, process of mixing, organic fertilizer, animal waste, waste disposal, digester

Для цитирования: Рубцов А.А., Немущенко Д.А. Подходы к численному моделированию работы биореакторов анаэробного сбраживания: обзор // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2025. Т. 55. № 5. С. 115–129. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-5-11>

For citation: Rubcov A.A., Nemuschenko D.A. Approaches to numerical modeling of anaerobic digestion bioreactor operation: a review. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2025, vol. 55, no. 5, pp. 115–129. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-5-11>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Благодарность

Работа выполнена в рамках субсидии Министерства науки и инновационной политики Новосибирской области, договор № Т-34 от 22.09.2023 г.

Acknowledgments

The work was carried out within the framework of a subsidy from the Ministry of Science and Innovation Policy of the Novosibirsk Region, agreement No. T-34 dated September 22, 2023.

На объектах сельского и фермерского хозяйства образуются многотоннажные отходы животноводства. Отходами животноводства называют субстанцию, которая остается в результате процесса жизнедеятельности сельскохозяйственных животных и птицы. Кроме непосредственно органических составляющих навоза и помета, в состав входят прочие компоненты: технологическая и смывная вода, кормовые остатки, стимуляторы роста и антибиотики, газообразные вещества.

Отходы животноводческих ферм содержат около 100 разновидностей возбудителей опасных болезней. При хранении под открытым небом высвобождаются летучие компоненты, которые имеют сильный запах, это так называемые «дурнопахнущие вещества» – одна из экологических проблем населенных пунктов, расположенных в непосредственной близости к животноводческим комплексам. Кроме того, в результате разложения происходит

загрязнение воздуха парниковыми газами, загрязнение поверхностных и подземных вод некоторыми специфическими соединениями.

В связи с интенсивным развитием сельского хозяйства актуальной проблемой является деградация почвенного покрова в результате загрязнения отходами животноводства. Важно своевременно утилизировать отходы и переводить их в экономически эффективное органическое удобрение, а затем включать в систему органического земледелия как элемент технологии получения здоровой растениеводческой продукции. В мировой практике имеется достаточный опыт эксплуатации биогазовых установок на органическом сырье, в том числе отходах аграрного сектора.

К сожалению, недооценивается практическая значимость переработки отходов животноводства в новые биоорганические продукты, пригодные в том числе для становления органического земледелия, в основе которого

главенствующую роль играет микробиота. Производство биоудобрений может осуществляться перерабатывающими комплексами с таким режимом утилизации отходов животноводства, в результате которого возможно получение безопасного биоорганического продукта на основе гумусовых веществ, фитогормонов, полезной микробиоты. Полученный продукт может способствовать переводу минеральных элементов почвы в более доступную форму для растений. Определенные группы анаэробных бактерий способны поддерживать и усиливать адаптационные свойства растений.

Биогазовые установки и комплексы различных конструкций реализуют процесс анаэробного сбраживания. Интенсивность протекания процесса сбраживания и получения эффективного биоорганического удобрения определяется созданием в реакторе наиболее оптимальных условий для жизнедеятельности колоний микроорганизмов. В качестве наиболее важных показателей процесса можно определить следующие:

- градиент температур в емкости биореактора;
- кислотность среды и содержание продуктов жизнедеятельности;
- скорость перемещения частиц биомассы и потоков в реакторе;
- характеристики питательной среды.

Немаловажными являются состав и технология подготовки сырья, технология ввода в реактор и прочие технологические особенности.

Процесс перемешивания субстрата в биореакторах напрямую влияет на указанные выше показатели и решает следующие задачи¹⁻³:

– ускорение заквашивания свежей порции сырья вследствие контакта с биологически активной жидкостью в реакторе, поддержание контакта между ферментами и их субстратами;

– равномерное распределение тепла и питательных веществ по объему реактора;

– предотвращение образования корочки на границе жидкой и газообразной сред;

– интенсификация отвода биогаза из субстрата.

Перемешивание может производиться механическими приспособлениями в ферментере (мешалками), перекачиванием сырья из верхней зоны в нижнюю с помощью насоса, расположенного, как правило, вне реактора⁴, и пневматически посредством барботирования биогазом массы в реакторе. Преимущества и недостатки указанных методов перемешивания подробно описаны⁵. Например, в Германии до 90% биогазовых установок укомплектованы различными по конструкции мешалками (см. сноску 1).

Оптимизация перемешивания чрезвычайно важна, так как это один из наиболее энергозатратных процессов при эксплуатации реактора анаэробного сбраживания. Авторами исследовательской работы ставилась следующая общая цель – модернизация действующего комплекса переработки органических отходов методом анаэробного сбраживания. Модернизация включает внедрение системы автоматизированного управления, повышение его энергетической эффективности и качества получаемого органического удобрения за счет улучшения условий перемешивания. Для достижения цели проводился обзор имеющегося обширного, особенно зарубежного, опыта в области эксплуатации биогазовых установок.

¹Руководство по биогазу. От получения до использования: проект // Агентство по возобновляемым ресурсам (FNR), перев. с немецкого, 5-е издание, перераб. Германия, Гюльцов, 2010. 213 с.

²Веденев А.Г., Маслов А.Н. Строительство биогазовых установок: краткое руководство. Бишкек: «Евро», 2006. 28 с.

³Шаяхметов Р.Г., Исаков В.Г., Ефремов С.М. Опыт применения программного комплекса ANSYS WORKBENCH для моделирования процессов перемешивания в метантенках // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. 2013. Т. 3. № 59. С. 127–131.

⁴Rico C., Rico J.L., Munoz N., Gomez B., Tejero I. Effect of mixing on biogas production during mesophilic anaerobic digestion of screened dairy manure in a pilot plant // Engineering in Life Sciences. 2011. Vol. 11. N 5. P. 476–481. DOI: 10.1002/elsc.201100010.

⁵Суслов Д.Ю. Перемешивание биомассы в биореакторе получения биогаза // Эпоха науки. 2015. № 4. С. 444–447.

Обзор публикаций направлен на выявление направлений и подходов к численной оптимизации биореакторов, а также показателей, характеризующих режим перемешивания в реакторе с целью получения биоудобрения, выявление факторов, которыми можно пренебречь. На основе полученного массива информации формулировались задачи численного моделирования условий перемешивания в реакторах действующего комплекса узким специалистам.

В рамках обзора остановимся на общих направлениях в области численного моделирования биореакторов, не углубляясь в описание математического алгоритма и программного кода.

Температурные условия (абсолютные значения и градиент) в реакторе оказывают наибольшее влияние на рост и активность микроорганизмов, а соответственно кинетику и стабильность анаэробного процесса [1]. Наиболее часто температурные условия проектируются с целью наибольшего выхода биогаза и максимальное содержание в нем метана⁶ [2].

Немаловажную роль играет кислотность среды (рН). Различные популяции микроорганизмов требуют определенных оптимальных диапазонов рН, при которых они проявляют максимальную активность [3]. Например диапазон рН 5,5–6,5 является наиболее предпочтительным для гидролиза и ацидогенеза, для ацетогенеза и метаногенеза наиболее подходящее значение рН находится в диапазоне 7,0–8,5.

Методы математического (численного) моделирования, реализуемые в виде программных комплексов различных разработчиков, находят все большее применение при проектировании биогазовых установок и комплексов. Расчеты и наглядные материалы, полученные в результате моделирования, позволяют без проведения натурных дорогостоящих экспериментов оценить влияние физико-химических и биологических про-

цессов, происходящих в реакторе, факторов смещения и других технологических особенностей на эффективность получения продуктов переработки. Численное моделирование используется для оптимизации форм, конструкций и режимов эксплуатации биореакторов для повышения производительности и качества получаемых продуктов.

Авторы обзора [1] приводят классификацию методов численного моделирования процессов анаэробного сбраживания, нашедших практическое применение:

1) модели, основанные на математических формулировках базовых законов, отражающих физико-химические и биологические процессы в реакторе: элементарные модели; модели с учетом преимущественно массопереноса; модели на основе вычислительной гидродинамики;

2) кинетические модели;

3) феноменологические модели: модели регрессии; модели, основанные на методе опорных векторов; модели, использующие нейронные сети и/или искусственный интеллект и др.

Первый тип моделей построен на законах гидродинамики, теплопередачи, результатах исследования биохимических процессов. Очевидно, что такие модели должны иметь приоритетное применение, но они обладают важными недостатками:

– наличие значительного количества неизвестных исходных данных, которые требуется определять экспериментально;

– ограниченные вычислительные ресурсы из-за необходимости одновременного учета в модели различных физико-химических процессов.

Элементарные модели основаны на расчете динамики отдельных компонентов в реакторе – жидкой, твердой и газообразной фаз – концентрации твердых частиц субстрата биологического и минерального происхождения, концентрации растворимых компонентов и групп микроорганизмов, концентрации ком-

⁶Sihuang Xie, Faisal I. Hai, Xinmin Zhan, Wenshan Guo, Hao H. Ngo, William E. Price, Long D. Nghiem. Anaerobic co-digestion: a critical review of mathematical modelling for performance optimization // *Bioresource Technology*. 2016. N 222. P. 498–512. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.10.015.

понентов биогаза. В основном включают решение систем дифференциальных уравнений, позволяющих описать процессы массопереноса или условия равновесия.

Модели, основанные на расчете массопереноса, учитывают прежде всего диффузию и конвективный перенос, применяются, по мнению авторов⁷ [1], в случае концентрированного субстрата в реакторе (более 15 мас.% твердой фазы). При содержании твердой фазы более 15 мас.% применяют термин «твердофазное анаэробное сбраживание» («solid-state anaerobic digestion»).

Считаем наиболее перспективным в этой области направление, связанное с моделированием (и вообще изучением механизмов) переноса продуктов биохимических процессов между твердыми частицами сырья (субстрата) и клетками микроорганизмов, что пытались моделировать авторы⁸⁻⁹.

Модели, основанные на вычислительной гидродинамике, отражают важнейшие процессы, происходящие при перемешивании. С их помощью проводят оптимизацию конструкций реакторов и механизмов перемешивания, а также снижают энергопотребление. Наибольшее распространение получили коммерческие программные продукты, такие как ANSYS Fluent [4–6], ANSYS CFX [7] и COMSOL Multiphysics [8]. К недостаткам исследовательских работ, где применяются эти продукты, можно отнести ограниченное использование биохимических реакций совместно с моделированием гидродинамики.

Так называемые «кинетические модели» основаны на использовании адекватных упрощенных уравнений, связывающих производительность биореактора с некоторыми входными данными, полученными на основе лабораторного эксперимента или результатов промышленной эксплуатации реактора. Такие модели предназначены для упрощения процесса моделирования с опорой на два ос-

новных предположения, являющихся узкими местами в технологии синтеза биогаза [1]:

- концентрация полезных микроорганизмов является единственной ответственной за производство биогаза/ CH_4 характеристикой;
- рост численности микроорганизмов ограничен только скоростью гидролиза и доступностью частиц субстрата для питания.

Феноменологические модели используют различные технологии машинного обучения и направлены на решение ограниченного числа целевых задач. Основное преимущество заключается в том, что построение модели не требует глубокого понимания биохимических, химических и физико-химических процессов, происходящих во время анаэробного сбраживания [1].

Машинное обучение может быть основано на результатах натурных испытаний, связывающих производительность биореактора по выходу газа со следующими характеристиками процесса, например [9]:

- состав сырья и соотношение компонентов субстрата (коммунальные сточные воды и ил, сельскохозяйственные отходы – солома, силос, шелуха, овощные отходы, углеводы, белки, липиды и т.д.), показатель химического потребления кислорода;
- добавки (различные колонии микроорганизмов, ферменты, микроэлементы, пеногасители, сорбенты), дозировка и размер частиц материалов;
- условия процесса анаэробного сбраживания (температура, значение pH, электропроводность, технологии предварительной обработки сырья, доля органической составляющей).

Программный пакет ANSYS CFX позволяет при наличии многочисленных упрощений моделировать поле скоростей и температур в объеме реактора при постановке задачи непрерывной подачи холодного субстрата с заданным расходом [7]. Для валидации модели

⁷Fuqing Xu, Yebo Li, Zhi-Wu Wang. Mathematical modeling of solid-state anaerobic digestion // Progress in Energy and Combustion Science. 2015. N 51. P. 49–66. DOI: 10.1016/j.pecs.2015.09.001.

⁸Kalyuzhnyi S.V., Veeken A., Hamelers H.V.M. Two-particle model of anaerobic solid state fermentation // Water Sci. Technol. 2000. Vol. 41. N 3. P. 43–50. DOI: 10.2166/wst.2000.0054.

⁹Fuqing Xu, Zhi-Wu Wang, Li Tang, Yebo Li. A mass diffusion-based interpretation of the effect of total solids content on solid-state anaerobic digestion of cellulosic biomass // Bioresource Technology. 2014. N 167. P. 178–185. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.05.114.

проводили совместное сбраживание рисовой шелухи и свиного навоза в двух типах биореакторов – с системой перемешивания методом рециркуляции субстрата через приемную и выпускную трубы и без перемешивания.

Для моделирования гидродинамики считалось, что биореактор работает при низких скоростях потока в струе рециркуляции ($Re < 2000$), модели турбулентности не применялись. Реактор анализировался в стационарном и переходном состояниях, учитывалась теплопередача от змеевика. Исходя из результатов оценки тепловых потоков, процесс можно считать изотермическим [7].

Авторы¹⁰ расчетным методом исследовали температурное поле в реакторе биогазовой установки.

Метод основан на решении непрерывной функции, позволяющей моделировать процесс теплопроводности. В качестве объекта для моделирования выбран горизонтальный реактор (цистерна), разделенный вертикальными перегородками на секции, без устройств перемешивания. Подробно описана математическая модель, приводятся результаты вычислительного эксперимента.

Обширный опыт применения моделей вычислительной гидродинамики для изучения и оптимизации процессов анаэробного сбраживания систематизировали авторы [10]. В обзоре рассматриваются конкретные исследования, показывающие возможность учета сочетания биохимических и гидродинамических моделей, турбулентности, процессов передачи тепла, реакторов различных конструкций, многофазность среды.

Согласно обзору применяются следующие гидродинамические параметры, по мнению авторов, влияющие на биохимические процессы и/или повышающие эффективность выработки биогаза: число Рейнольдса, индекс однородности поля скоростей, градиент скорости, напряжение сдвига, объем мертвой

зоны, завихренность, спиральность потока, угол между вектором завихренности и вектором скорости, время циркуляции, потребляемая на перемешивание мощность, расход субстрата. В частности, напряжение сдвига необходимо оценивать, поскольку оно влияет на жизнедеятельность микроорганизмов.

Разработаны модели, учитывающие неоднородность внутренней среды биореактора – наличие дисперсных сред: жидкость – твердое тело, жидкость – газ, жидкость – газ – твердое тело¹¹ [10].

Yu L. et al. (см. сноску 11) проводили валидацию сложной многоступенчатой модели на лабораторном (1 л) и пилотном (70 л) реакторах в форме вертикальной трубы, перемешивание осуществлялось методом циркуляции субстрата. Концентрация твердой фазы составляла не более 5 мас.%. При моделировании были приняты следующие допущения:

- жидкая фаза – ньютоновская жидкость – вода при температуре 35 °C;
- газообразная фаза – пузырьки газа размером 0,1 мм, плотностью 1,139 кг/м³, вязкостью $1,9 \cdot 10^{-5}$ кг/(м · с);
- твердая фаза – частицы сферической формы определенного диаметра.

Система дифференциальных уравнений программировалась на платформе Matlab/Simulink, гидродинамика – с помощью пакета FLUENT.

Очевидно, что в процессе перемешивания формируется развитый турбулентный режим. Тем не менее, согласно обзору [10] только 18% рассмотренных публикаций учитывают этот фактор в модели, подробно рассмотрены методы учета турбулентности и имеющийся опыт.

Модели, учитывающие процессы распределения тепла, также незаслуженно используются в меньшем количестве, возможно, это связано с превалированием публикаций авторов из теплых стран. Работа Merlin G. et al.¹²

¹⁰Ильин Ю.П., Белов А.В., Стабулит И.С., Кузьмина Н.Ю., Рудных Н.В. Определение характеристик стационарного случайного процесса в реакторе биогазовой установки по одной реализации // АПК России. 2017. Т. 24. № 2. С. 418–425.

¹¹Liang Yu, Jingwei Ma, Craig Frear, Quanbao Zhao, Robert Dillon, Xiuji Li, Shulin Chen Multiphase modeling of settling and suspension in anaerobic digester // Appl. Energy. 2013. № 111. P. 28–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.073>.

¹²Gerard Merlin, Francois Kohler, Maele Bouvier, Thierry Lissolo, Herve Boileau. Importance of heat transfer in an anaerobic digestion plant in a continental climate context // Bioresource Technology. 2012. N 124. P. 59–67. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.08.018.

посвящена изучению необходимости учета теплопотерь для реакторов, работающих в условиях континентального климата. Используется модель стационарного теплопереноса, неопределенность расчета по сравнению с экспериментальными измерениями (~10%). Принципиально важно использовать такие модели на стадии проектирования установок для снижения тепловых потерь в окружающую среду. В частности авторам¹³ удалось выявить потоки и снизить потери тепла через систему ввода и крышку полузаглубленного реактора – на 30%, потери с биогазом – на 15%. В расчетах учитывались атмосферные условия, в том числе температура окружающей среды в течение года, солнечное излучение, интенсивность дождя.

Thakur H. et al. [11] в качестве критериев сравнения эффективности процессов перемешивания определили следующие параметры:

1) мертвый объем (объем застойных зон), определяемый долей объема реактора со скоростью движения менее 5% от максимальной (в данном исследовании – 0,64 м/с);

2) градиент скорости, определяемый по формуле

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}\right)^2},$$

где u_x , u_y и u_z – скорость ячейки в направлениях x , y и z соответственно;

3) индекс однородности:

$$UI = \frac{\sum_i |v_i - \bar{v}| V_i}{2\bar{v} \sum_i V_i}, \text{ при } \bar{v} = \frac{\sum_i v_i V_i}{\sum_i V_i},$$

где v_i и V_i – скорость и объем ячейки, $\bar{v}$ – усредненная по объему скорость в реакторе. Значение UI меняется от 0 (однородное смешение) до 1 (нет однородности).

Как было показано исследованиями, при моделировании перемешивания малоконцентрированных суспензий (менее 2,5 мас.%)

твердой фазы) субстрат можно считать ньютоновской жидкостью. Выход биогаза в этом случае мало зависит от частоты вращения лопастей мешалки [11].

Thakur H. et al. [11] для проведения исследования были выбраны четыре кубических и один цилиндрический реактор с переменным размером крыльчатки. Моделирование проводилось с использованием пакета ANSYS Fluent в стационарном и переходном режимах. Принята однофазная среда и неньютоновская жидкость, так как исследование ориентировано на большое содержание твердой фазы. Для каждого реактора были построены профили скоростей и температур, на основе чего оптимизирован процесс перемешивания и сделаны выводы о корреляции между потреблением энергии на перемешивание и параметрами процесса – мертвый объем, градиент скоростей и индекс однородности. В [12] моделировали гидродинамику и распределение тепла при совместном сбраживании пищевых отходов, осадка сточных вод и коровьего навоза (инокулята) в различных соотношениях в мезофильных реакторах объемом 0,25 и 6,5 л с непрерывным перемешиванием. Дополнительно варьировали концентрации твердой фазы в диапазоне от 2,5 до 12,1 мас.%.

В проведенных исследованиях [13, 14] сделан акцент на моделировании высоких концентраций твердой фазы (до 12 мас.%) и особенности реологии в этом случае при перемешивании. Численное моделирование в пакете ANSYS Fluent сопровождается валидацией экспериментальными данными. Задача ставилась исходя из предположения предшественников авторов о большем выходе биогаза при повышении концентрации органической фазы. Доля органики в иле описывается концентрацией твердых частиц вообще [13]. Моделируется работа лабораторных реакторов цилиндрической и яйцевидной формы с мешалками двух типов – пропеллерной (три пропеллера на одном валу) и шнековой (спиральная ленточная). В лабораторном

¹³Rainier Hreiz, Nouceiba Adouani, Yves Jannot, Marie-Noelle Pons. Modeling and simulation of heat transfer phenomena in a semi-buried anaerobic digester // Chem. Eng. Res. Des. 2017. N 119. P. 101–116. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.01.007.

эксперименте реология моделируется смесью глицерина и воды, без твердой примеси. В [14] в процессе натурного эксперимента определяли содержание твердой фазы и минеральной составляющей, pH, химическое потребление кислорода, концентрации летучих жирных кислот, температуру и выход биогаза. Показана хорошая сходимость численного моделирования и результатов измерения поля скоростей. Ожидаемо для вязкой жидкости более эффективной с точки зрения равномерности поля скоростей оказалась шнековая мешалка [13].

Otieno E.O. et al. [15] использовали так называемый «план Бокса – Бенкена» (Box Behnken Design) – способ организации эксперимента и обработки массива данных методами математической статистики, который позволил выявить, какие из множества экспериментальных параметров оказывают наиболее значимое влияние на эффективность сбраживания – выход биогаза. В лабораторном эксперименте сбраживали сельскохозяйственные отходы (отходы переработки ананаса) совместно с отходами жизнедеятельности крупного рогатого скота с использованием домашних биогазовых систем Rehau объемом 6 м³. Варьируемыми параметрами были выбраны следующие – температура в реакторе, pH субстрата и концентрация отходов переработки ананаса в субстрате. Программный продукт Design Expert использовали для построения графиков и поверхностей отклика для оптимизации условий эксперимента и снижения необходимого количества экспериментальных данных. Поверхности отклика позволяют оценить выход биогаза в зависимости от двух варьируемых параметров.

В [16] аналогично предыдущей работе сбраживали сточные воды заводов дистилляции совместно с отходами животноводства в упрощенном лабораторном эксперименте. Вместо соотношения сырьевых материалов варьировали время удерживания субстрата в реакторе в диапазоне 17–22 дня.

Результаты исследования Kim M., Cui F. [17] дают исчерпывающую информацию и

являются образцом подхода и использования моделей, основанных на машинном обучении. Машинное обучение строилось на экспериментальных данных, собранных в ходе длительной эксплуатации лабораторных (эксплуатируемых в течение 350 дней), пилотных (150 дней) и полномасштабных (750 дней) реакторов анаэробного сбраживания. На примере сбраживания канализационного ила и пищевых отходов при варьировании режимов в реакторах и непрерывном перемешивании контролировалось прежде всего производство биогаза и химическое потребление кислорода (ХПК).

Расчеты проводили с использованием комплекса MATLAB для статистической обработки данных и построения регрессионных моделей. Наличие экспериментальных данных позволяет производить валидацию результатов расчета на различных уровнях и масштабировать результаты исследования на другие установки. Построенные по результатам моделирования поверхности отклика, например, ХПК от содержания общего азота и выхода метана хорошо соотносятся с экспериментальными данными [17].

Наиболее важным направлением численного моделирования, с нашей точки зрения, является необходимость разработки моделей, позволяющих прогнозировать биохимические процессы и жизнедеятельность консорциума микроорганизмов, а также возможность их интегрирования с моделями гидродинамики. Конечной целью большинства исследований в этой области является получение зависимости скорости разложения и преобразования органического вещества и роста производства биогаза от биохимических и гидродинамических показателей в реакторе [17]. Так как объем необходимых вычислений кратно возрастает, исследования направлены на упрощение моделей и выявление факторов, которыми можно пренебречь. Так, модели Wu B. et al.¹⁴ и Tobo Y.M. et al. [4] показывают хорошее приближение к экспериментальным данным и учитывают ги-

¹⁴Binxin Wu, Eric L. Bibeau, Kifle G. Gebremedhin. Three-dimensional numerical simulation model of biogas production for anaerobic digesters // ASAE Annu. Meet. Am. Soc. Agric. Biol. Eng. 1. 2006. DOI: 10.13031/2013.20924.

дроллиз углеводов, белков и липидов до растворимого сахара, аминокислот и длинноцепочечных жирных кислот, а также изменение массы органики.

Vavilin V.A. et al.^{15, 16} также строили математическую модель на исследовании кинетики анаэробных процессов (гидролиз сырья, кислотообразование, метаногенез), учитывались концентрации жирных кислот и pH среды. Показано, что при высокой интенсивности перемешивания субстрат преобразуется в большей степени в жирные кислоты, а не в целевой продукт – метан.

Dabiri S. et al. [18] интегрировали процессы гидролиза и преобразования субстрата микроорганизмами (разложения, образования конгломератов) в численную гидродинамическую модель. Перемешивание в модельном реакторе осуществлялось методом рециркуляции. Для упрощения расчета после сравнения показателей гидродинамики 2D и 3D моделирования, реактор был смоделирован в 2D.

Более сложная модель Rezavand M. et al. [6] связывает некоторые биохимические процессы с гидродинамикой. Расчетная область разбивается на элементы, каждый из которых несет информацию о биологически активных соединениях и следует потоку субстрата. Массоперенос между частицами воспроизводится уравнением диффузии. Модель включает четыре процесса: гидролиз субстрата, ацидогенез (переработка растворимых соединений ацидогенными бактериями), ацетогенез (переработка летучих жирных кислот и образование ацетата ацетогенными бактериями, разлагающими пропионаты и бутират) и метаногенез (потребление ацетата и образование метана метаногенными бактериями). Эти биологические реакции моделируются как система обыкновенных дифференциальных уравнений.

Немногочисленные работы посвящены количественным оценкам сообществ микро-

организмов. В частности, Yu S. et al. [19] применяли различные модели машинного обучения для определения взаимосвязей между микробным сообществом, pH и содержанием летучих жирных кислот в составе субстрата (определяли уксусную, пропионовую, масляную, изомасляную, валериановую, изовалериановую и капроновую кислоты) в процессе анаэробного сбраживания. В субстрате оценивали содержание 7 семейств архей и 30 типов бактерий.

Исходные данные для модели формировали на основе лабораторных исследований в миниреакторах (флаконы по 250 мл), в качестве субстрата для сбраживания использовалась молочная сыворотка, в качестве инокулята – анаэробный ил очистных сооружений. Варьировалась органическая загрузка реакторов, которая количественно определялась значением ХПК. Для набора необходимого объема данных эксперимент проводился в общей сложности 281 день на 15 реакторах. Для проверки эффективности обобщенной модели машинного обучения экспериментальные данные были разделены на наборы данных обучения, проверки и тестирования [19].

Из [19] приведем некоторые особенности выбора микробиологических сообществ. В качестве целевых использовались четыре бактериальные группы (*Bacteroidetes*, *Firmicutes*, *Proteobacteria* и *Spirochaetes*) и четыре архейных семейства (*Methanobacteriaceae*, *Methanoregulaceae*, *Methanomicrobiaceae* и *Methanomassiliicoccaceae*). *Bacteroidetes*, *Firmicutes* и *Proteobacteria* являются основными бактериями, опосредованно влияющими на гидrolитическую ферментацию в реакторах [19]. *Bacteroidetes* и *Firmicutes* являются наиболее распространенными бактериями, участвующими в ацидогенезе, выделяют ферменты для разложения органических веществ и способны выживать в экстремальных условиях [20]. *Spirochaetes* были предложены как

¹⁵Vavilin V.A., Angelidaki I. Anaerobic degradation of solid material: importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2D distributed model // Biotechnology and Bioengineering. 2005. V. 89. № 1. P. 113-122. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.20323>.

¹⁶Vavilin V.A., Lokshina L.Y., Flotats X., Angelidaki I. Anaerobic digestion of solid material: multidimensional modeling of continuous-flow reactor with nonuniform influent concentration distributions // Biotechnology and Bioengineering. 2007. V. 97. № 2. P. 354-366. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.21239>.

бактериальный тип, который активно воздействует на глюкозу и ацетат¹⁷.

Указанные бактериальные сообщества были выбраны в том числе из-за их многочисленности. По результатам исследования для стабильной работы биореактора было предложено оптимальное относительное содержание *Methanoreg.* и *Methanomicrob.*, как 15–37 и 3–15% соответственно.

Следует отметить, что высокая интенсивность перемешивания и возникающие напряжения сдвига отрицательно сказываются на жизнедеятельности микроорганизмов – подавляется их активность, разрушается флокуляционная структура¹⁸ [21].

Некоторые виды микроорганизмов могут быть уязвимыми к механическим повреждениям из-за особой морфологии клеток – нитевидных или других структур со значительными линейными размерами. Есть публикации, показывающие необходимость организации в реакторе «защитных» застойных зон, которые могут служить центрами инициации метаногенов и защищать их от закисления (см. сноску 18).

Кроме того, сообщается (см. сноску 18), что непрерывная работа мешалки способствует быстрому гидролизу, в результате чего накапливаются кислоты, ингибирующие метаногенные бактерии. В работе анализируется механизм снижения выхода биогаза при интенсивном перемешивании. Также отмечаются работы авторов, которые показали на экспериментальных данных, что даже при полном разрушении конгломератов (хлопьев) микроорганизмов валовой выход биогаза не уменьшается.

Проведенный обзор опыта численного моделирования показал отсутствие интереса исследователей к повышению качества второго важнейшего продукта технологии анаэ-

робного сбраживания – биоорганического удобрения. В России установки анаэробного сбраживания, направленные на производство биогаза, не эффективны, так как имеются свои дешевые энергетические ресурсы (природный газ, сетевая электроэнергия), с одной стороны, и суровые климатические условия, а также непозволительно большие сроки окупаемости подобных установок, с другой стороны. Основные критерии эффективности перемешивания должны быть связаны с качеством получаемого жидкого субстрата.

Большинство исследователей пришли к выводу, что однозначно определиться с параметрами процесса перемешивания на основе лабораторных экспериментов, результатов моделирования или расчета невозможно^{19, 20} (см. сноску 18).

Режимы перемешивания (частота вращения мешалки, периодичность включения) на реальных объектах, как правило, определяются на этапе отладки работы биореактора. Из-за разнообразия выпускаемых промышленностью конструкций смесительных устройств сравнение результатов моделирования разных авторов является затруднительным. Для наглядности в табл. 1 приведены примеры наиболее полно описанных результатов исследований, позволяющих оценить разнообразие процессов и подходов к моделированию условий в реакторах.

С учетом развития вычислительных мощностей наиболее перспективными для практического применения при производстве биоудобрения, по нашему мнению, следует считать модели следующих типов:

– модели, основанные на машинном обучении, которые позволяют прогнозировать развитие микробиологических сообществ и прошедшие верификацию на полупромышленных экспериментальных данных в условиях сбраживания конкретных субстратов;

¹⁷Sang-Hoon Lee, Jeong-Hoon Park, Sang-Hyoun Kim, Byung Jo Yu, Jeong-Jun Yoon, Hee-Deung Park. Evidence of syntrophic acetate oxidation by *Spirochaetes* during anaerobic methane production // *Bioresour. Technol.* 2015. N 190. P. 543–549. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.02.066.

¹⁸Lindmark J., Thorin E., Fdhila R.B., Dahlquist E. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2014. № 40. P. 1030–1047. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.182.

¹⁹Руководство по биогазу. От получения до использования: проект // Агентство по возобновляемым ресурсам (FNR), перев. с немецкого, 5-е издание, перераб. Германия, Гюльцов, 2010. 213 с.

²⁰Karim K., Hoffmann R., Klasson T., Al-Dahhan M.H. Anaerobic digestion of animal waste: waste strength versus impact of mixing // *Bioresour. Technol.* 2005. Vol. 96. № 16. P. 1771–1781. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.01.020.

Табл. 1. Примеры подходов к моделированию условий перемешивания и рассмотренные субстраты
Table 1. Examples of approaches to mixing conditions modeling and the substrates considered

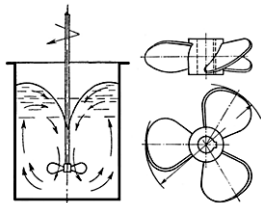
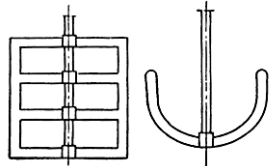
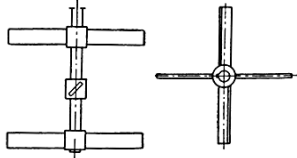
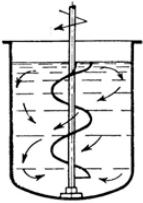
№ п.п.	Характеристика субстрата	Показатели эффективности процесса	Заложенные в модель физико-химические процессы	Форма реактора	Источник информации
1	Модельная смесь глицерина и воды	Доля «мертвого» объема	Гидродинамика, учет турбулентности	Лабораторный цилиндрический с винтовой (шнековой) мешалкой	[13]
2	Пищевые отходы, ил сточных вод бумажной фабрики	Доля «мертвого» объема, градиент скорости, температурное поле	Гидродинамика, распространение тепла, учет турбулентности	Лабораторный кубический	[14]
3	Пищевые отходы, ил сточных вод бумажной фабрики, навоз крупного рогатого скота (КРС)	Доля мертвого объема, градиент скорости, химическое потребление кислорода (ХПК), содержание органических кислот, концентрация твердой фазы	Гидродинамика, распространение тепла	Лабораторные реакторы объемом 0,25 и 6,5 л	[12]
4	Сельскохозяйственные отходы (отходы переработки ананаса), навоз КРС	Температурное поле, pH субстрата, концентрация твердой фазы	Статистическая обработка, построение поверхностей отклика в ПО «Design Expert»	Биогазовая система Rehaui объемом 6 м ³	[15]
5	Сточные воды заводов дистилляции, навоз КРС	Температурное поле, pH субстрата, время удерживания субстрата в реакторе	Статистическая обработка, построение поверхностей отклика	Лабораторный цилиндрический объемом 600 мл	[16]
6	Ил очистных сооружений канализации, пищевые отходы	Выход биогаза, химическое потребление кислорода	Машинное обучение	Лабораторный (2 и 5 л), пилотный (1,2 и 4,2 м ³) и полномасштабный (2320 м ³) цилиндрические реакторы	[17]
7	Ил очистных сооружений канализации, навоз КРС	Объемная доля и время удержания твердой фазы, выход и скорость производства биогаза	Гидродинамика, учет многофазной среды (жидкость – газ – твердое тело)	Лабораторный (1 л) и пилотный (70 л) реакторы цилиндрической формы	См. сноску 11
8	Молочная сыворотка, ил очистных сооружений канализации	Микробное сообщество, pH субстрата, содержанием летучих жирных кислот, ХПК	Машинное обучение	Лабораторный миниреактор (флакон 250 мл)	[19]

– численные модели и программные средства, которые позволяют совместить гидродинамические параметры, параметры поля температур при перемешивании и подаче новой порции субстрата в реактор и некоторые наиболее важные биохимические процессы,

приводящие к образованию лимитирующих продуктов стадий ацидогенеза и ацетогенеза.

В табл. 2 приведены типы механических мешалок, которые находят применение при гомогенизации субстрата в биореакторах. Тип мешалки в основном определяется вязкостью субстрата и формой реактора.

Табл. 2. Рекомендованные типы механических мешалок для биогазовых реакторов и их применение
Table 2. Recommended types of mechanical stirrers for biogas reactors and their applications

Тип мешалки	Характеристика мешалки	Источник информации
Пропеллерная мешалка 	Быстроходная мешалка, наиболее эффективна для суспендирования при малой вязкости субстрата. Эффективна для интенсификации биохимических процессов. Рекомендуется трехлопастное исполнение. Возможно не только соосное реактору расположение, но и косое, эксцентричное, боковое. Возможно образование воронки при работе.	[14], [22], См. сноску 21
Рамная и якорная мешалка 	Тихоходная мешалка. Используется для гомогенизации субстрата высокой вязкости (до 100 Па·с). Форма мешалки повторяет профиль днища реактора. Разбивает корочку на поверхности субстрата. Создает преимущественно окружную циркуляцию.	См. сноску 22
Лопастная мешалка 	Тихоходная мешалка, используется для гомогенизации субстрата высокой вязкости (до 100 Па·с). Возможность варьировать количество лопастей и их наклон. Простота изготовления и монтажа. Преимущественно окружная циркуляция.	[11], см. сноску 23, [22]
Шнековая (винтовая) мешалка 	Тихоходная мешалка. Используется для гомогенизации субстрата высокой вязкости (до 100 Па·с и более). Обеспечивает меньшее электропотребление для вязких сред.	[13]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tina Kegl, Eloísa Torres Jimenez, Breda Kegl, Anita Kovac Kralj, Marko Kegl. Modeling and optimization of anaerobic digestion technology: Current status and future outlook // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2025. N 106. DOI: 10.1016/j.pecs.2024.101199.
2. Nurul Islam Siddique Md., Zularisam Ab. Wahid. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: a review // *Journal of Cleaner Production*. 2018. N 194. P. 359–371. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.155.
3. Abdul-Aziz Issah, Telesphore Kabera, Francis Kemausuor. Biogas optimisation processes and effluent quality: a review // *Biomass and Bioenergy*. 2020. N 133. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105449.
4. Yohannis Mitiku Tobo, Usman Rehman, Jan Bartacek, Ingmar Nopens. Partial integration of ADM1 into CFD: understanding the impact of diffusion on anaerobic digestion mixing // *Water Sci. Technol.* 2020. Vol. 81. N 8. P. 1658–1667. DOI: 10.2166/wst.2020.076.
5. Soroush Dabiri, Alireza Noorpoor, Maziar Arfaee, Prashant Kumar, Wolfgang Rauch. CFD

²¹Karim K., Hoffmann R., Klasson T., Al-Dahhan M.H. Anaerobic digestion of animal waste: waste strength versus impact of mixing // *Bioresour. Technol.* 2005. Vol. 96. N 16. P. 1771–1781. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.01.020.

²²Гауфуллин И.Х. Разработка конструкции и обоснование параметров малообъемной биогазовой установки: автореф. ... канд. техн. наук по специальности 05.20.01 – Технология и средства механизации сельского хозяйства. Казань, 2022. 20 с.

²³Ямполов С.С., Кобыкова Е.Н., Друзянова В.П. Обоснование применения перемешивающего устройства в биогазовой установке для малых животноводческих хозяйств // *Вестник ВСГУТУ*. 2014. № 4. С. 13–19.

- modeling of a stirred anaerobic digestion tank for evaluating energy consumption through mixing // *Water*. 2021. N 13. DOI: 10.3390/w13121629.
6. *Massoud Rezavand, Daniel Winkler, Johannes Sappl, Laurent Seiler, Michael Meister, Wolfgang Rauch*. A fully Lagrangian computational model for the integration of mixing and biochemical reactions in anaerobic digestion // *Computers and Fluids*. 2019. N 181. P. 224–235. DOI: 10.1016/j.compfluid.2019.01.024.
 7. *Leite S.A.F., Leite B.S., Ferreira D.J.O., Bae-ta B.E.L., Dangelo J.V.H.* The effects of agitation in anaerobic biodigesters operating with substrates from swine manure and rice husk // *Chemical Engineering Journal*. 2023. N 451. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138533.
 8. *Leonzio G.* Study of mixing systems and geometric configurations for anaerobic digester using CFD analysis // *Renewable Energy*. 2018. N 123. P. 578–589. DOI: 10.1016/j.renene.2018.02.071.
 9. *Rohit Gupta, Le Zhang, Jiayi Hou, Zhikai Zhang, Hongtao Liu, Siming You, Yong Sik Ok, Wangliang Li*. Review of explainable machine learning for anaerobic digestion // *Bioresource Technology*. 2023. N 369. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128468.
 10. *Helene Caillet, Alain Bastide, Laetitia Adelard*. Advances in Computational Fluid Dynamics modeling of anaerobic digestion process for renewable energy production: A review // *Cleaner Waste Systems*. 2023. N 6. DOI: 10.1016/j.clwas.2023.100124.
 11. *Hemant Thakur, Narendra Kumar Verma, Atul Dhar, Satvasheel Powar*. Investigation of continuous stirred tank reactors for improving the mixing in anaerobic digestion: A numerical study // *Results in Engineering*. 2023. N 19. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101317.
 12. *Hemant Thakur, Rashmi Ira, Narendra Kumar Verma, Vikas Sharma, Shrawan Kumar, Atul Dhar, Tulika Prakash, Satvasheel Powar*. Anaerobic co-digestion of food waste, bio-flocculated sewage sludge, and cow dung in CSTR using E(C2)Tx synthetic consortia // *Environmental Technology and Innovation*. 2023. N 32. DOI: 10.1016/j.eti.2023.103263.
 13. *Thomas Neuner, Michael Meister, Martin Pillei, Wolfgang Rauch*. Optimizing mixing efficiency of anaerobic digesters with high total solids concentrations using validated CFD simulations // *Biochemical Engineering Journal*. 2024. N 208. DOI: 10.1016/j.bej.2024.109320.
 14. *Hemant Thakur, Narendra Kumar Verma, Atul Dhar, Satvasheel Powar*. Anaerobic co-digestion of food waste and bio flocculated sewage sludge towards bio-methane production // *Energy Reports*. 2024. N 11. P. 2867–2876. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.02.040.
 15. *Edwin Ochieng Otieno, Robert Kiplimo, Urbanus Mutwiwa*. Optimization of anaerobic digestion parameters for biogas production from pineapple wastes co-digested with livestock wastes // *Heliyon*. 2023. N 9. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14041.
 16. *Weldehans Mebrahtom Gebresemati*. Optimization of distillery-sourced wastewater anaerobic digestion for biogas production // *Cleaner Waste Systems*. 2023. N 6. DOI: 10.1016/j.clwas.2023.100118.
 17. *Kim Moonil, Cui Fenghao*. Multiple-layer statistical methodology for developing data-driven models of anaerobic digestion process // *Journal of Environmental Management*. 2023. N 347. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119153.
 18. *Soroush Dabiri, Prashant Kumar, Wolfgang Rauch*. Integrating biokinetics with computational fluid dynamics for energy performance analysis in anaerobic digestion // *Bioresource Technology*. 2023. N 373. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128728.
 19. *Sung Il Yu, Heewon Jeong, Juhee Shin, Seung Gu Shin, Ather Abbas, Daeun Yun, Hyokwan Bae, Kyung Hwa Cho*. Simulation models of microbial community, pH, and volatile fatty acids of anaerobic digestion developed by machine learning // *Journal of Water Process Engineering*. 2024. N 60. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105225>.
 20. *Hasan Pasalari, Mitra Gholami, Abbas Rezaee, Ali Esrafi, Mahdi Farzadkia*. Perspectives on microbial community in anaerobic digestion with emphasis on environmental parameters: A systematic review // *Chemosphere*. 2021. N 270. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128618.
 21. *Conti F., Saidi A., Goldbrunner M.* Numeric simulation-based analysis of the mixing process in anaerobic digesters of biogas plants // *Chemical Engineering & Technology*. 2020. Vol. 43. N 8. P. 1522–1529. DOI: 10.1002/ceat.201900650.
 22. *Philipp Kress, Hans-Joachim Nagele, Andreas Lemmer, Bastian Kolb*. Flow velocities and flow profiles in a thoroughly mixed biogas fermenter // *Landtechnik*. 2020. Vol. 75. N 2. P. 35–50. DOI: 10.15150/lt.2020.3230.

REFERENCES

1. Tina Kegl, Eloísa Torres Jimenez, Breda Kegl, Anita Kovac Kralj, Marko Kegl. Modeling and optimization of anaerobic digestion technology: Current status and future outlook. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2025, no. 106. DOI: 10.1016/j.pecs.2024.101199.
2. Nurul Islam Siddique Md., Zularisam Ab. Wahid. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: a review. *Journal of Cleaner Production*, 2018, no. 194. P. 359–371. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.155.
3. Abdul-Aziz Issah, Telesphore Kabera, Francis Kemausuor. Biogas optimisation processes and effluent quality: a review. *Biomass and Bioenergy*, 2020, no. 133. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105449.
4. Yohannis Mitiku Tobo, Usman Rehman, Jan Bartacek, Ingmar Nopens. Partial integration of ADM1 into CFD: understanding the impact of diffusion on anaerobic digestion mixing. *Water Sci. Technol*, 2020, vol. 81, no. 8, p. 1658–1667. DOI: 10.2166/wst.2020.076.
5. Soroush Dabiri, Alireza Noorpoor, Maziar Arfaee, Prashant Kumar, Wolfgang Rauch. CFD modeling of a stirred anaerobic digestion tank for evaluating energy consumption through mixing. *Water*, 2021, no. 13. DOI: 10.3390/w13121629.
6. Massoud Rezavand, Daniel Winkler, Johannes Sappl, Laurent Seiler, Michael Meister, Wolfgang Rauch. A fully Lagrangian computational model for the integration of mixing and biochemical reactions in anaerobic digestion. *Computers and Fluids*, 2019, no. 181, pp. 224–235. DOI: 10.1016/j.compfluid.2019.01.024.
7. Leite S.A.F., Leite B.S., Ferreira D.J.O., Baeta B.E.L., Dangelo J.V.H. The effects of agitation in anaerobic biodigesters operating with substrates from swine manure and rice husk. *Chemical Engineering Journal*, 2023, no. 451. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138533.
8. Leonzio G. Study of mixing systems and geometric configurations for anaerobic digester using CFD analysis. *Renewable Energy*, 2018, no. 123, pp. 578–589. DOI: 10.1016/j.renene.2018.02.071.
9. Rohit Gupta, Le Zhang, Jiayi Hou, Zhikai Zhang, Hongtao Liu, Siming You, Yong Sik Ok, Wangliang Li. Review of explainable machine learning for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 2023, no. 369. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128468.
10. Helene Caillet, Alain Bastide, Laetitia Adeland. Advances in Computational Fluid Dynamics modeling of anaerobic digestion process for renewable energy production: A review. *Cleaner Waste Systems*, 2023, no. 6. DOI: 10.1016/j.clwas.2023.100124.
11. Hemant Thakur, Narendra Kumar Verma, Atul Dhar, Satvasheel Powar. Investigation of continuous stirred tank reactors for improving the mixing in anaerobic digestion: A numerical study. *Results in Engineering*, 2023, no. 19. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101317.
12. Hemant Thakur, Rashmi Ira, Narendra Kumar Verma, Vikas Sharma, Shrawan Kumar, Atul Dhar, Tulika Prakash, Satvasheel Powar. Anaerobic co-digestion of food waste, bio-flocculated sewage sludge, and cow dung in CSTR using E(C2)Tx synthetic consortia. *Environmental Technology and Innovation*, 2023, no. 32. DOI: 10.1016/j.eti.2023.103263.
13. Thomas Neuner, Michael Meister, Martin Pillei, Wolfgang Rauch. Optimizing mixing efficiency of anaerobic digesters with high total solids concentrations using validated CFD simulations. *Biochemical Engineering Journal*, 2024, no. 208. DOI: 10.1016/j.bej.2024.109320.
14. Hemant Thakur, Narendra Kumar Verma, Atul Dhar, Satvasheel Powar. Anaerobic co-digestion of food waste and bio flocculated sewage sludge towards bio-methane production. *Energy Reports*, 2024, no. 11, pp. 2867–2876. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.02.040.
15. Edwin Ochieng Otieno, Robert Kiplimo, Urbanus Mutwiwa. Optimization of anaerobic digestion parameters for biogas production from pineapple wastes co-digested with livestock wastes. *Heliyon*, 2023, no. 9. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14041.
16. Weldehans Mebrahtom Gebresemati. Optimization of distillery-sourced wastewater anaerobic digestion for biogas production. *Cleaner Waste Systems*, 2023, no. 6. DOI: 10.1016/j.clwas.2023.100118.
17. Kim Moonil, Cui Fenghao. Multiple-layer statistical methodology for developing data-driven models of anaerobic digestion process. *Journal of Environmental Management*, 2023, no. 347. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119153.
18. Soroush Dabiri, Prashant Kumar, Wolfgang Rauch. Integrating biokinetics with computational fluid dynamics for energy performance analysis in anaerobic digestion. *Bioresource*

- Technology*, 2023, no. 373. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128728.
19. Sung Il Yu, Heewon Jeong, Juhee Shin, Seung Gu Shin, Ather Abbas, Daeun Yun, Hyokwan Bae, Kyung Hwa Cho. Simulation models of microbial community, pH, and volatile fatty acids of anaerobic digestion developed by machine learning. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, no. 60. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105225>.
20. Hasan Pasalari, Mitra Gholami, Abbas Rezaee, Ali Esrafil, Mahdi Farzadkia. Perspectives on microbial community in anaerobic digestion with emphasis on environmental parameters: A systematic review. *Chemosphere*, 2021, no. 270. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128618.
21. Conti F., Saidi A., Goldbrunner M. Numeric simulation-based analysis of the mixing process in anaerobic digesters of biogas plants. *Chemical Engineering & Technology*, 2020, vol. 43, no. 8, pp. 1522–1529. DOI: 10.1002/ceat.201900650.
22. Philipp Kress, Hans-Joachim Nagele, Andreas Lemmer, Bastian Kolb. Flow velocities and flow profiles in a thoroughly mixed biogas fermenter. *Landtechnik*, 2020, vol. 75, no. 2, pp. 35–50. DOI: 10.15150/lt.2020.3230.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рубцов А.А., аспирант, ORCID 0009-0008-5989-8165, SPIN-код 1559-6239

✉ **Немущенко Д.А.**, старший преподаватель, ORCID 0009-0000-8262-237X, SPIN-код 6213-1170; **адрес для переписки:** Россия, 630073, Новосибирск, проспект К. Маркса, 20; e-mail: nemuschenko@corp.nstu.ru

AUTHOR INFORMATION

Alexandr A. Rubcov, Post-graduate Student; ORCID 0009-0008-5989-8165, SPIN-code 1559-6239

✉ **Dmitriy A. Nemuschenko**, Senior Lecturer, ORCID 0009-0000-8262-237X, SPIN-code 6213-1170; **address:** 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia; e-mail: nemuschenko@corp.nstu.ru

Дата поступления статьи / Received by the editors 24.02.2025
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 30.04.2025
Дата публикации / Published 16.06.2025