

УДК 628.336.6

Е. А. Кононова, магистрант
М. В. Свалова, кандидат технических наук, доцент
кафедры «Водоснабжение и водоподготовка»
А. М. Непогодин, старший преподаватель кафедры «Водоснабжение и водоподготовка»
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СУБСТРАТА ПРИ АНАЭРОБНОМ СБРАЖИВАНИИ В БИОРЕАКТОРЕ*

В работе исследован процесс перемешивания осадков сточных вод в биореакторе яйцевидной формы с помощью циркуляционной трубы. Яйцевидная форма имеет наименьшую площадь поверхности, что позволит минимизировать затраты энергии на обогрев смеси в биореакторе. Математическое моделирование проводилось на основе программного комплекса Flow Vision. Получены поля векторов скоростей при перемешивании субстрата. Поставленная задача решается с помощью двумерных дифференциальных уравнений Навье – Стокса.

Ключевые слова: осадки сточных вод, биогаз, математическая модель, биореактор, дифференциальное уравнение, граничные условия.

Постоянно растущие цены на ископаемое органическое топливо делают весьма актуальными задачи изыскания альтернативных, постоянно возобновляемых источников энергии. Использование отходов городского хозяйства как альтернативных и возобновляемых источников тепловой и электрической энергии давно является одним из важнейших направлений в энергетической стратегии многих стран мира. Особое внимание уделяется развитию технологий для получения биогаза [1].

Перспективным направлением переработки осадков сточных вод является биохимическое преобразование путем анаэробного сбраживания в биореакторах – метантенках. Технология исключает бактериальное и химическое загрязнение окружающей среды, позволяет получать грунт, применяемый в озеленении [2].

Анализ существующих метантенков позволяет выявить наиболее оптимальную форму реактора. Зарубежный опыт в сфере биогазовых технологий показал целесообразность строительства и эксплуатации метантенков яйцевидной формы (рис. 1).



Рис. 1. Строительство метантенка яйцевидной формы (Германия)

С точки зрения статической прочности, создания условий для перемешивания жидкого осадка и его отвода предпочтительным является использование яйцеобразного резервуара (рис. 2). Для предотвращения коркообразования лучше применять резервуары с узкой горловиной и небольшой площадью поверхности сбраживаемого осадка, что позволяет повысить интенсивность газовыделения.



Рис. 2. Метантенк яйцевидной формы (Германия)

Яйцевидная форма метантенка обеспечивает максимальный объем при минимальной поверхности, что позволит сократить материалоемкость при строительстве и теплопотере при эксплуатации метантенков. Резервуар метантенков выполнен из монолитного железобетона с предварительно напряженной арматурой. В метантенках яйцевидной формы обеспечиваются минимальные затраты железобетона и минимальные теплопотери. Кроме того, такая форма препятствует накоплению песка и образованию корки [3].

Одним из решающих факторов эффективности работы метантенка является режим перемешивания субстрата, поскольку осадок может образовать корку на поверхности и препятствовать выходу биогаза. Это делает актуальным изучение процессов движения жидкости и перемешивания субстрата в биореакторе [4].

Характеристики процессов течения жидкости при перемешивании содержимого в метантенке можно определить экспериментально и теоретически.

Для решения задачи по определению технических показателей циркуляционного перемешивания осадка сточных вод в метантенке необходимо проведение математического моделирования процессов гидродинамики, переноса теплоты и концентрации компонентов на основе двухмерных дифференциальных уравнений Навье – Стокса, записанных в цилиндрической системе координат в общем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(y\rho Q) + \text{div}(y\rho u Q) = \text{div}(y\Gamma \text{grad} Q) + yS,$$

где Q – обобщенная переменная, вектор зависимых переменных задачи; Γ – суммарные коэффициенты переноса, учитывающие конвекцию и диффузию; S – источниковые члены, соответствующие компонентам вектора Q :

$$Q = \begin{pmatrix} 1 \\ u \\ v \\ T \end{pmatrix}, \quad \Gamma = \begin{pmatrix} 0 \\ \mu \\ \mu \\ \lambda/c \end{pmatrix},$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ -\partial(y p)/\partial x + y\rho g\beta(T-T_\infty) \\ -\partial(y p)/\partial y - 2y\mu V/y^2 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где u – проекция вектора скорости на ось x ; v – проекция вектора скорости на ось y ; T – температура; μ – коэффициент динамической вязкости; p – давление; λ – коэффициент теплопроводности среды; c – теплоемкость среды; β – коэффициент температурного расширения осадка; $T - T_\infty$ – повышение температуры нагретой частицы жидкости по сравнению с температурой частиц, оставшихся не нагретыми [5].

Граничные условия задаются в соответствии с конструкцией метантенка и климатическими условиями наружной поверхности (рис. 3).

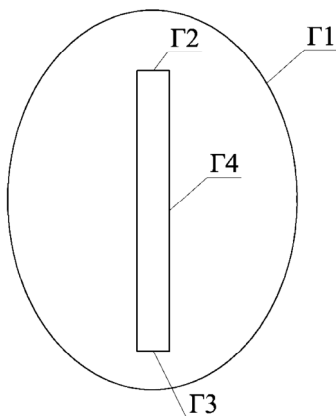


Рис. 3. Схема расчетной области: Г1 – поверхность резервуара (твердая стенка); Г2 – входная граница расчетной области; Г3 – выходная граница расчетной области; Г4 – поверхность циркуляционного трубопровода (твердая стенка)

В начальный момент времени осадок в резервуаре неподвижный, а температура одинаковая во всем объеме:

$$u = 0, \quad v = 0, \quad T = T_H.$$

Граничные условия на границах расчетной области следующие:

– стенка резервуара Г1 рассматривается как твердая стенка, на которой задаются условия прилипания. Температура внутренней поверхности стенки определяется в результате решения сопряженной задачи теплообмена для области стенки резервуара со слоем теплоизоляции:

$$u = 0, v = 0, T_{CT,r=R} = T_{M,r=R},$$

$$\lambda_{CT} \left(\frac{\partial T_{CT}}{\partial r} \right)_n = \lambda_M \left(\frac{\partial T_M}{\partial r} \right)_n;$$

– на входной границе Г2 задается скорость истечения осадка из подающего трубопровода, которая зависит от производительности перемешивающего устройства, является переменной и определяется методом итераций при совместном решении систем уравнений, описывающих совместную работу резервуара, насоса и сети трубопроводов. Температура осадка на входной границе принимается 35 °С:

$$u = u_0, \quad v = 0, \quad T = T_g;$$

– на выходной границе Г3 расчетной области задаются мягкие условия:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

– на свободной поверхности стенки трубопровода Г4, подающего подогретый осадок, для скорости заданы условия прилипания, а температура наружной поверхности стенки трубопровода принимается постоянной и равной температуре горячего топлива:

$$u = 0, \quad v = 0, \quad T = T_g.$$

Математическое моделирование производилось на основе программного комплекса Flow Vision. В результате получены наглядные изображения векторов полей скоростей движения субстрата в биореакторе (рис. 4).

На этих изображениях видно, что весь объем метантенка участвует в перемешивании осадка. Создание такой математической модели помогает избежать больших финансовых затрат для проведения эксперимента. Также преимуществом этого метода является то, что мы быстро можем изменить условия проведения эксперимента и получить новые данные.

После проведения математического моделирования необходимо провести экспериментальное исследование анаэробного сбраживания осадков сточных вод на ОСК МУП гор Ижевска «Ижводоканал».

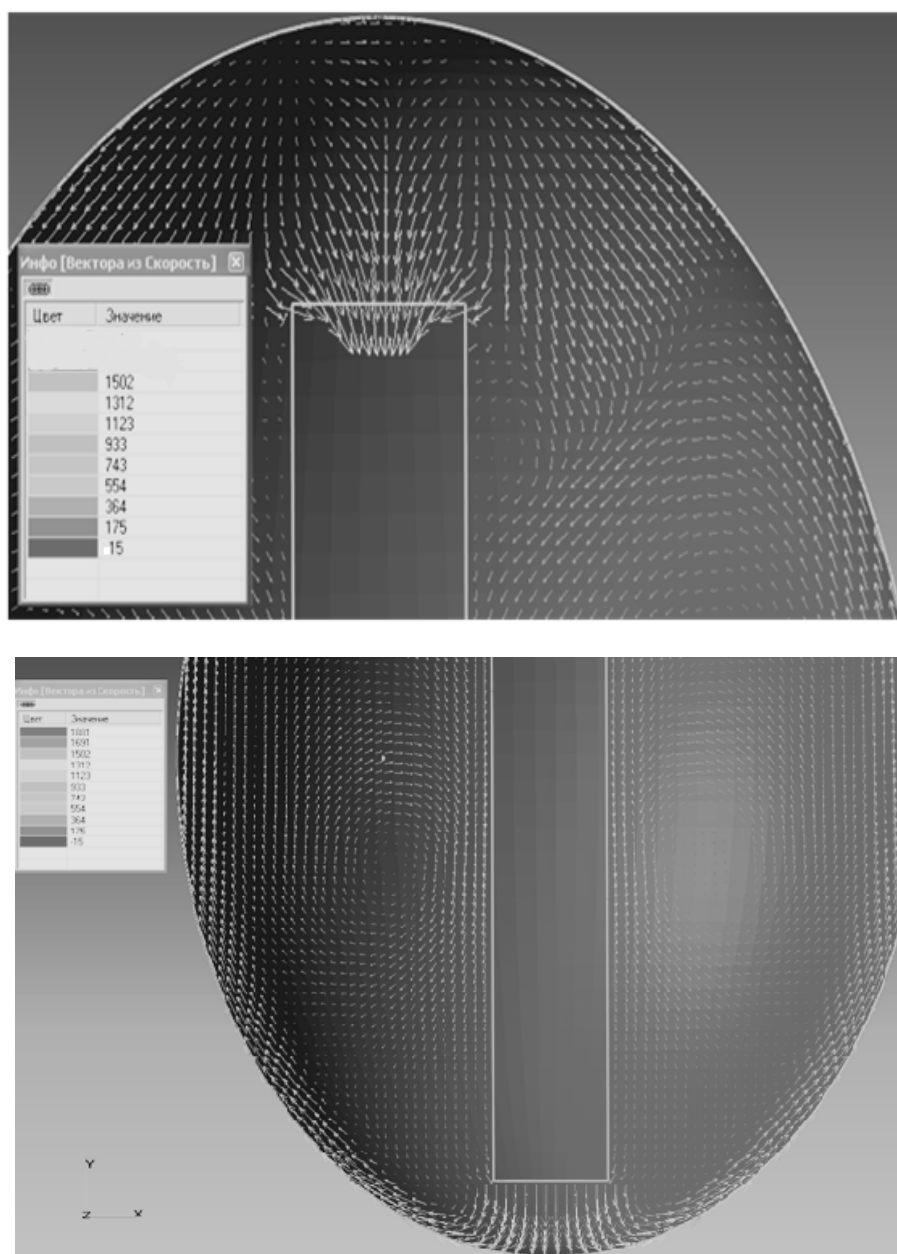


Рис. 4. Распределение векторов скоростей

В рамках договора НИР № ВиВ-1-12/с от 16.07.2012 г. нами проводятся анализы и исследования в лаборатории биотехнологий, рассматриваются процессы сбраживания осадков сточных вод в биореакторе АН-БР-3. Проводя эксперименты на биореакторе АН-БР-3, изучаются процессы сбраживания осадков сточных вод, определяется количество и состав образовавшегося биогаза.

Для проведения анализов в лаборатории биотехнологий установлено следующее оборудование:

1. Система микроволнового разложения Berghof SPEEDWAVE MWS-2+ DAC-70.
2. Система очистки воды Simplicity S.Kit (EU).
3. Прямой микроскоп Olympus серии CX41 в комплекте с компьютером и принтером.
4. Спектрофотометр АА-7000.

Для приготовления растворов необходима дистиллированная вода, подготовленная на приборе для получения особо чистой воды (фирмы Millipore). Прибор позволяет за короткое время получить воду необходимого качества.

С помощью микроскопа мы можем проследить за жизнедеятельностью анаэробных микроорганизмов. Это очень важно, т. к. биогаз является продуктом жизнедеятельности бактерий, и от них зависит его выход.

АА-7000 – двухлучевой атомно-абсорбционный спектрометр позволяет проводить высокочувствительные анализы по определению тяжелых металлов. На спектрофотометре определяем содержание тяжелых металлов в субстрате до загрузки и после обработки в биореакторе. Прибор обеспечивает превосходную чувствительность и надежность результатов

в области сверхнизких концентраций. С помощью спектрометра мы можем минимизировать погрешности, связанные с человеческим фактором, и добиться высокой точности результатов. Все полученные данные выводятся на компьютер.

Система микроволнового разложения SPEED-WAVE MWS-2 позволяет сократить время подготовки пробы до 15–45 минут. Герметичность автоклава позволяет избежать испарения вредных веществ. С помощью этой системы мы можем существенно быстрее получать и обрабатывать результаты.

Выводы:

1. Математическое моделирование позволяет проследить за распределением векторов скоростей в объеме метантенка при анаэробном сбраживании осадков сточных вод.

2. Появляется возможность за достаточно малый период времени поставить несколько численных экспериментов, внося изменения в математическую модель.

3. Лаборатория биотехнологий используется как центр коллективного пользования для проведения научных экспериментов, исследования состава осадков сточных вод в рамках договора НИР № ВиВ-1-12/с от 16.07.2012 г., обучения студентов, проведения конференций, круглых столов и повышения квалификации сотрудников предприятий и научных учреждений.

Библиографические ссылки

1. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: теория и практика / пер. с нем. и предисл. М. И. Серебряного. – М. : Колос, 1982. – 148 с.
2. Гюнтер Л. И., Гольдфарб Л. Л. Метантенки. – М. : Стройиздат, 1991.
3. Миронова Е. А., Непогодин А. М. Перспективная технологическая схема работы метантенков на ОСК г. Ижевска // Стратегические проекты освоения водных ресурсов в XXI веке: правовые, социально-экономические и экологические аспекты : сборник материалов XVII Международной научно-образовательной конференции студентов. – Тюмень : Изд-во ТюмГАСУ, 2013. – С. 174–176.
4. Миронова Е. А., Непогодин А. М. Получение и использование биогаза из органических отходов очистных сооружений канализации // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : сборник материалов научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых. – Екатеринбург : Изд-во Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2012. – С. 371–373.
5. Пугачев Е. А. Проектирование сооружений переработки и утилизации осадков сточных вод с использованием элементов компьютерных информационных технологий. – М. : АСВ, 2011.

* * *

E. A. Kononova, Master's degree student, Kalashnikov ISTU

M. V. Svalova, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

A. M. Nepogodin, Senior Lecturer, Kalashnikov ISTU

Mathematical modeling for substrate stirring process within anaerobic fermentation

The work is devoted to investigation of stirring processes for waste water in the egg-shaped bioreactor by means of a circulation tube. The egg shape has the least cross-section that allows minimizing the energy cost for mixture heating in the bioreactor. Mathematical modeling was carried out by means of the Flow Vision software. Vector fields for velocities of substrate stirring are obtained. The stated task is solved by two-dimensional Navier-Stokes differential equations.

Keywords: waste water, biogas, mathematical model, bioreactor, differential equation, boundary conditions

Получено: 12.03.15