

Введение В процессе метанового брожения биоотходов важную роль играет перемешивание. Перемешивание способствует равномерному распределению популяции бактерий, pH и температуры; повышает контакт между микроорганизмами и субстратом; предотвращает формирование осадка на дне и образование корки на свободной поверхности; позволяет предотвратить формирование пустот и скоплений, уменьшающих рабочую площадь метантенка; помогает освободить пузырьки биогаза [1, 2, 3]. Согласно ГОСТ Р 53790-2010, оптимальное перемешивание сырья в метантенке увеличивает выход биогаза на 50%. Особенностью системы гидравлического перемешивания содержимого метантенка является то, что она позволяет создать оптимальные условия для метаногенного консорциума, представляющего собой уникальную группу бактерий, чувствительную к изменениям температуры и различного рода механическим воздействиям. Способы перемешивания Учитывая особенности процесса метанового брожения, разработана установка анаэробной переработки органических отходов с системой гидравлического перемешивания (патент на полезную модель № 115350). Отличительной особенностью системы перемешивания метантенка является наличие модифицированного контура, в котором перемешивание осуществляется рециркуляцией субстрата через два подводящих и один отводящий патрубок, расположенный в верхней части метантенка. Биомасса под давлением подается через нижний подводящий патрубок в придонную область метантенка, препятствуя образованию осадка, и через верхний подводящий патрубок на уровень зеркала жидкости, препятствуя формированию корки на свободной поверхности в метантенке. На основе описанного в патенте принципа работы биогазовой установки смоделирован метантенк с системой гидравлического перемешивания, представленный на рис.1 (способ гидравлического перемешивания 1). Рис. 1 - Способ гидравлического перемешивания 1 Разработанный способ гидравлического перемешивания, представляет собой комбинацию трех внешних контуров циркуляции органического субстрата, описанных в [4, 5], и одного модифицированного контура, описанного в патенте [6]. Предложенный способ сравнивается со способом гидравлического перемешивания, представленным в [4, 5], как широко распространенным на практике (способ гидравлического перемешивания 2). Рециркуляция органического субстрата осуществляется с помощью внешнего циркуляционного контура, представляющего собой трубу с центробежным насосом, при этом подача органического субстрата осуществляется через боковую стенку в придонную область аппарата, а отвод – из верхней части метантенка. В работе рассмотрен метантенк с системой гидравлического перемешивания, состоящей из четырех циркуляционных контуров (рис.2). Таким образом, в работе рассмотрено два способа гидравлического перемешивания: модифицированный способ 1 и стандартный способ 2. Целью численных исследований является оценка эффективности

модифицированной системы гидравлического перемешивания при различных геометрических параметрах метантенка. Рис. 2 - Способ гидравлического перемешивания

2 Математическая модель гидравлического перемешивания

Для оценки качества перемешивания рассмотрим процесс гидравлического перемешивания в реакторе метанового брожения. Математическое моделирование происходящих при этом процессов проведено при следующих допущениях. а) Субстрат является гомогенной жидкостью, вязкость и плотность которой зависят от концентрации. б) Процессы диффузии пренебрежимо малы по сравнению с конвективным переносом массы. с) Температура постоянна. (1) (2) (3) где $\vec{v}$ - вектор скорости, м/с; t - время, с; ρ - субстанциональная (полная) производная по времени; σ - тензор напряжений, Па; p - давление, Па; $\mathbf{e}$ - единичный тензор; $\mathbf{D}$ - тензор скоростей деформации; η - вязкость субстрата, Па·с; $\vec{g}$ - вектор ускорения свободного падения. При этом плотность смеси определяется плотностью фаз, а эффективная вязкость связана с объемной концентрацией дисперсной среды формулой Эйнштейна [7]. Для получения решения системы дифференциальных уравнений (1) - (3) необходимо задать краевые условия. Начальное распределение объемной концентрации при задается для условия наличия осадка на дне метантенка. Начальные условия: $\rho = \rho_0$, $\vec{v} = 0$. Граничные условия для скорости: - на твердых границах резервуара задаются условия прилипания жидкости; - на входных отверстиях задаются профили скорости, соответствующие сформировавшемуся профилю скорости ньютоновской жидкости в круглой трубе, концентрация на входе равна концентрации на выходе; - полагая, что выход из резервуара представляет трубу такой длины, на выходе из которой можно считать движение жидкости установившимся, принимаем в качестве граничных условий на выходе - условие стабилизации скорости; - на открытой границе: $p = p_0$, где p_0 - давление газа, $\mathbf{n}$ - нормаль к поверхности субстрата В качестве критерия перемешивания предлагается безразмерная величина [8]: $\bar{Q} = \frac{Q}{Q_{\max}}$, (4) где Q - средний по объему метантенка выход биогаза, зависящий от распределения поля концентрации органического субстрата; $Q_{\max}$ - предельный выход биогаза. Результаты численных исследований Для решения поставленной задачи использовался пакет моделирования COMSOL Multiphysics 3.5, позволяющий решать системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. На основе возможностей COMSOL Multiphysics 3.5 была создана новая пользовательская модель, адаптированная к условиям рассматриваемой задачи. Достоверность полученных результатов обеспечивается тем, что в основе математической модели лежат классические уравнения механики сплошных сред. Кроме того, для верификации метода решения были проведены численные расчеты с использованием пакета прикладных программ COMSOL Multiphysics 3.5 задачи истечения круглой струи, имеющей аналитическое решение [9]. В данной работе исследованы метантенки с объемом рабочей области от 3 до 100 м³ и

соотношением [10, 11], где H – высота метантенка, R – радиус метантенка, r_1 – радиус входных и выходных патрубков. Соотношение высоты циркуляционных патрубков и высоты метантенка постоянно и составляет: $\frac{H}{R} = 2$; $\frac{H}{R} = 1$; $\frac{H}{R} = 0.5$, где H – высота верхних циркуляционных патрубков; R – высота нижних циркуляционных патрубков; r_1 – высота бокового циркуляционного патрубка в модифицированном контуре. Мощность на прокачку органического субстрата в рассматриваемых системах гидравлического перемешивания одинакова. В результате расчетов получены данные о качестве перемешивания для метантенков с различными геометрическими размерами. На рис. 3 представлены значения отношения $K1/K2$, где $K1$ – критерий оценки качества перемешивания для метантенков со способом перемешивания 1, $K2$ – критерий оценки качества перемешивания для аппаратов со способом перемешивания 2. Рис. 3 – Эффективность перемешивания в зависимости от соотношения H/R и объема метантенка. Значения отношения $K1/K2$ больше 1 указывает на то, что применение модифицированного способа перемешивания эффективно. Как видно из рисунка, с увеличением объема аппарата качество перемешивания в метантенке с модифицированным способом повышается относительно стандартного способа перемешивания для всех аппаратов с рассмотренными соотношениями H/R . Максимальный эффект использования модифицированной системы перемешивания наблюдается для метантенков с соотношением $H/R = 2$. Использование модифицированной системы гидравлического перемешивания в случае целесообразно для метантенков больших объемов. Для метантенков с соотношением $H/R = 2$ значения отношения $K1/K2$ близки к 1, что объясняется тем, что верхняя подающая струя не достигает нижних слоев и не влияет на перемешивание осадка в центральной части придонной области. Предложенный критерий оценки качества перемешивания отражает интенсивность выхода биогаза – целевого продукта процесса метанового брожения. На рис. 4 представлено количество биогаза, получаемое при оптимальном режиме перемешивания, для метантенков различных объемов с соотношением $H/R = 2$ и $H/R = 1$. Количество биогаза, получаемое в аппаратах с соотношением $H/R = 2$ не представлено, т.к. разница в объеме получаемого биогаза при рассмотренных способах гидравлического перемешивания незначительна. Из диаграммы видно, что при модифицированном способе гидравлического перемешивания возможен больший выход биогаза для всех рассмотренных объемов. Следует отметить, что при одинаковом объеме метантенков, соотношение обеспечивает больший выход биогаза. Рис. 4 – Выход биогаза в зависимости от способа перемешивания и соотношения H/R . Заключение Исследовано влияние геометрических пропорций аппарата на эффективность процесса метанового брожения биоотходов при использовании двух систем гидравлического перемешивания. Проведенные численные исследования показали, что использование модифицированной системы гидравлического перемешивания эффективно при соотношении $H/R = 2$.

Максимальный эффект от использования предложенного способа перемешивания будет достигаться при соотношении .