

Сулов Д.Ю., канд. техн. наук, доц.,  
Темников Д.О., магистрант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СУБСТРАТА В БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВКАХ\*

suslov1687@mail.ru

В последнее время в Российской Федерации наблюдается развитие систем альтернативной энергетики – биогазовых технологий. При этом для интенсификации процесса получения биогаза установки оснащают системами обогрева и перемешивания. Разработана компьютерная модель биореактора с механическим перемешиванием субстрата, как наиболее широко применяемым в биогазовых установках. Произведено моделирование процесса перемешивания биомассы в многофункциональном комплексе ANSYS, в результате которого определены направление и составляющие скорости потока при механическом способе перемешивания. Установлено, что в верхней части биореактора биомасса практически не движется, при этом в нижней части биореактора наблюдается двукратное превышение допустимых скоростей.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, механическое перемешивание, биореактор.

**Введение.** В последнее время на территории РФ в сельском хозяйстве начали внедряться биогазовые станции и установки, основной задачей которых является утилизация органических отходов [1, 2]. Утилизация происходит за счет активной жизнедеятельности микроорганизмов, которые переваривают белки, жиры, углеводы. Что бы обеспечить комфортную среду для размножения и жизнедеятельности микроорганизмов, необходимо поддерживать определенный, равномерный уровень температуры и распределение бактерий по всему объему биомассы. Для решения данных проблем применяют различные системы перемешивания, при этом в биогазовых установках наибольшее применение получил механический способ [2].

Известно, что для комфортного размножения бактерий, накладываются определенные ограничения, а именно: скорость движения потоков биомассы не должна превышать 0,6 м/с, а направление потоков рекомендуется создавать за счет тангенциальных и аксиальных скоростей [3]. Это обосновывается градиентом плотностей в вертикальной плоскости реактора, а также возможностью создания плавающей корки, препятствующей выходу газа. Поэтому актуальным является исследование скорости и направления движения биомассы при механическом перемешивании. Эффективным методом исследования гидродинамики двухфазных потоков, получившим в последнее время широкое применение, является компьютерное моделирование [4–6].

**Методология.** В работе использовались методы математического и компьютерного моделирования. Для создания модели биореактора использовался программный комплекс SolidWorks 2015 – САПР. Моделирование процесса перемешивания производилось методом Sliding-

mesh MRF вращения в программном пакете ANSYS FLUENT 15.0.7.

**Основная часть.** Разработан биореактор, представляющий собой резервуар цилиндрической формы с расположенной внутри мешалкой (рис. 1).

Биореактор заполнен до высотной отметки 2,2 метра. В качестве перемешиваемой среды была выбрана жидкость с плотностью  $\rho = 1016,04 \text{ м}^3/\text{кг}$  и динамической вязкостью  $\mu = 0,45 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , что соответствует навозу крупного рогатого скота влажностью 92 % при температуре 37 °С.



Рис. 1. Модель биореактора с мешалкой

Математическая постановка.

Движение вязкой, несжимаемой жидкости описывается уравнением Навье-Стокса и уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i^2} \right) + f_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (2)$$

где  $i, j = 1, 2, 3$ , предполагается суммирование по одинаковым индексам,  $x_1, x_2, x_3$  – пространственные координаты,  $t$  – время,  $f_i$  – массовые силы.

В этой системе уравнений независимыми искомыми параметрами являются 3 компоненты скорости и давление  $p$ .

В качестве граничного условия задается условие прилипания на всех твердых стенках: поверхность емкости и мешалки:

$$u_i |_{\Omega} = 0 \quad (3)$$

Аналитическое решение уравнений (1, 2) возможно только для локальных задач (течение Пуазейля и плоское течение Куэтта), поэтому более сложные задачи выполняют численным решением.

Из множества программ, для решения задач CFD, был выбран коммерческий пакет ANSYS FLUENT 15.0.7.

Из физической постановки следует, что рассматриваемая задача перемешивания нестационарная, т.к. имеется подвижный элемент-

мешалка, которая вращается с постоянной угловой скоростью в неподвижной системе отсчета.

Наличие пакета FLUENT в ANSYS R15 позволяет смоделировать движущуюся систему отсчета и тем самым решить задачи, в которых имеются движущиеся части. Это делается путем установки в выбранных зонах ячеек движущейся системы отсчета. Когда используется движущаяся система отсчета, уравнения движения преобразуются путем введения дополнительных членов ускорения, которые появляются из-за преобразования неподвижной системы отсчета в движущуюся систему отсчета. Решая эти уравнения установившемся способом, может быть смоделирован поток вблизи движущихся частей.

В нашей задаче использовалось MRF моделирование (Multiple Reference Frame), позволяющее смоделировать вращение движущихся частей с одновременным выходом из них газа.

Рассмотрим систему координат, которая вращается с постоянной угловой скоростью относительно неподвижной системы отсчета как показано на рисунке 2. Вектор  $\vec{r}_0$  показывает начало вращающейся системы координат.

Ось вращения задается единичным вектором направления  $\hat{a}$  так, что бы:

$$\vec{\omega} = \omega \cdot \hat{a} \quad (4)$$

В CFD задачах вычислительная область позиционируется относительно вращающейся системы координат так, чтобы любая точка в области вращения определялась вектором  $\vec{r}$  из начала вращающейся системы.

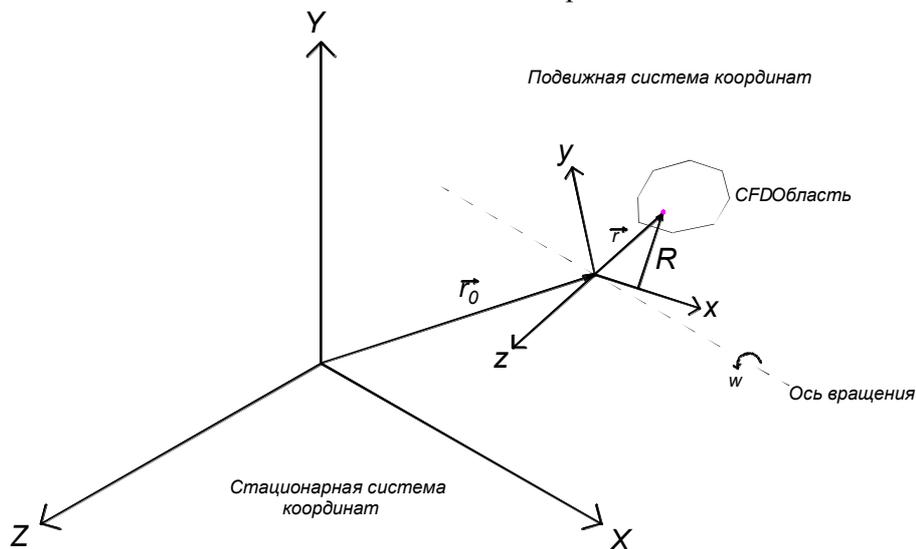


Рис. 2. Вращающаяся система отсчета относительно неподвижной

Переместить скорость движения жидкости из неподвижной системы в подвижную можно за счет применения следующего отношения:

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{u}_r \quad (5)$$

$$\vec{u}_r = \omega \cdot \vec{r} \quad (6)$$

где  $\vec{v}_r$  – относительная скорость, рассматриваемая относительно вращающейся системы координат,  $\vec{v}$  – абсолютная скорость относительно стационарной системы,  $\vec{u}_r$  – скорость «вихря»,

возникающего из-за движущейся системы отсчета.

Число Рейнольдса  $Re$  при течении в трубе определяется соотношением:

$$Re = \frac{ud_0\rho}{\mu} \quad (7)$$

где  $u$  – средняя скорость движения жидкости в трубе;  $d_0$  – внутренний диаметр трубы;  $\rho$  – плотность.

Для процессов, осуществляемых в аппаратах для перемешивания жидкостей, трудно определить критерии, в состав которых входит скорость  $u$ . Распределение скоростей в аппаратах с мешалками носит очень сложный характер, и в этом случае применять среднюю скорость  $u$  как при течении жидкости в трубе невозможно. Поэтому используют условную скорость, равную окружной скорости конца лопастей мешалки, опуская множитель  $\pi = 3,14$ .

Для течения жидкости в аппаратах с мешалками принимают условно  $\omega = \pi nd_m$ , и  $d_0 = d_m$  (диаметр мешалки) [19]. После исключения множителя  $\pi = 3,14$  как постоянной величины получаем:

$$Re = \frac{nd_m^2\rho}{\mu} \quad (8)$$

Для создания модели использовался программный комплекс SolidWorks 2015 – САПР, предназначенная для разработок изделий любой степени сложности и назначения.

Расчетная модель состоит из 3-х элементов:  
– перемешивающее устройство;

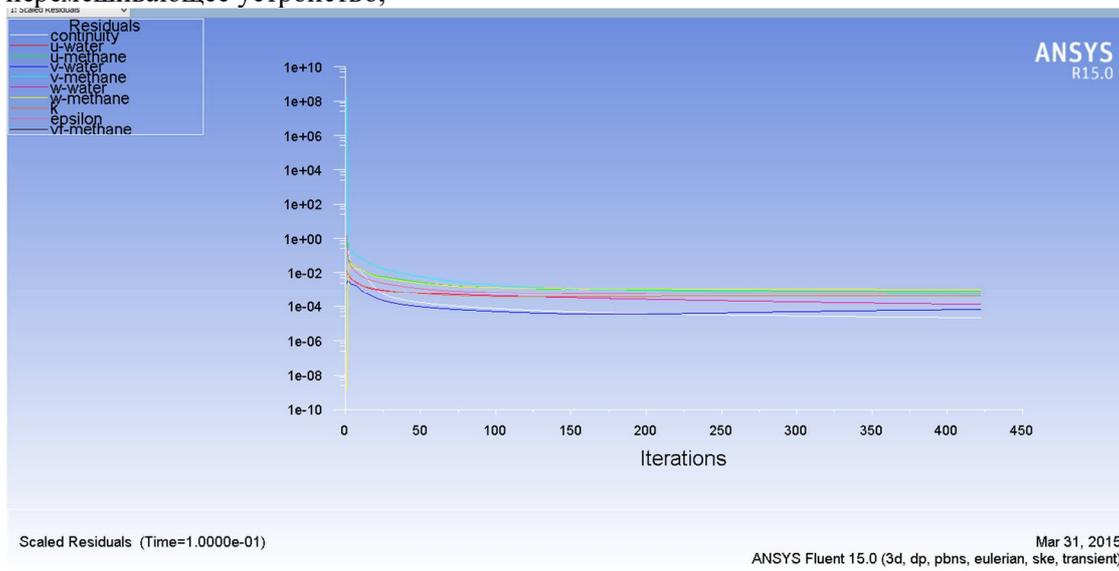


Рис. 3. График сходимости невязок методом конечных объемов

Расчет производился для  $Re = 4077,12$ , в результате которого было получено значение угловой скорости  $\omega = 3$  рад/с. В качестве режима движения жидкости использовалось уравнение

– емкость биореактора;

– область вращения, обусловленная принципом работы sliding-mesh вращения в FLUENT.

Емкость биореактора разбита на две части. В нижней части расположена область вращения. Это позволяет детализировать расчетную сетку в зоне возможной турбулентности, возникающей вне области вращения тем самым уточнив расчет.

Наиболее важным этапом при численном расчете любой задачи является качество построенной сетки. В нижней части емкость биореактора и в зоне вращения использовались ячейки в форме tetraider, это обеспечивает лучшую сходимость при коэффициенте турбулидации выше 1000. Минимальный размер ячеек  $2,3e-2$ .

В верхней части емкости биореактора использовались ячейки в форме hexaeder, обеспечивающие лучшую сходимость при низких значениях турбулидации. Максимальное значение ячеек –  $5e-2$ .

Число ячеек составило более 2 млн. единиц. При построении сетки использовалась размерная функция, которая позволила наложить более детальную сетку вблизи мешалки, так как в этих областях предполагаются наибольшие градиенты скорости и давления.

Был произведен расчет на сходимость заданных параметров, одним из показателей качества моделирования является плавное понижение экспоненты, без резких скачков и провалов (см. рис. 3).

Эйлера. Сходимость достигнута на 430 итерации.

Результаты моделирования распределения скоростей представлены на рисунке 4.

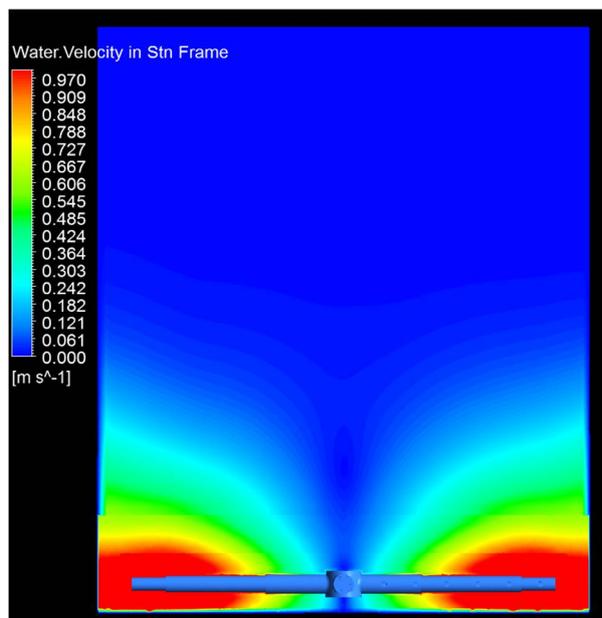


Рис. 4. Скорости движения биомассы при механическом перемешивании

Как видно из рисунков в верхней части биореактора биомасса практически не движется, вследствие чего возникают застойные зоны, уменьшающие эффективность работы биореактора и препятствующие выходу газа. Кроме того в нижней части биореактора наблюдается двукратное превышение допустимых скоростей (0,8-0,9 м/с), что негативно сказывается на жизнедеятельности метанообразующих бактерий.

**Выводы.** Разработана компьютерная модель биореактора получения биогаза с механическим перемешиванием. Произведено моделирование процесса перемешивания биомассы в биореакторе в многофункциональном комплексе ANSYS. Получены составляющие скорости

движения потока биомассы при механическом способе перемешивания.

\*Работа выполнена в рамках реализации стипендии Президента Российской Федерации СП – 1716.2015.1.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евстуничев М.А., Ильина Т.Н. Особенности сырьевой базы Белгородской области для производства биогаза // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 5. С. 170–173.
2. Суслов Д.Ю. Получение биогаза в биореакторе с барботажным перемешиванием: диссертация ... кандидата технических наук: 05.17.08 // Ивановский государственный химико-технологический университет. Белгород, 2013.
3. Эдер Б., Шульц Х. Биогазовые установки // перевод с нем. компании «Zorg Biogas»: 2008. 268 с.
4. Feoktistov A. Yu., Staroverov S. V., Gol'tsov A. B., Kireev V. M. Design of aspiration shelters for constricted conditions // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Т. 49. №. 3-4. pp. 261–264.
5. Шаптала В.Г., Шаптала В.В., Суслов Д.Ю. Вопросы моделирования и расчета барботажных реакторов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. №5. С. 189–192.
6. Кафаров В.В., Винаров А.Ю., Гордеев Л.С. Моделирование биохимических реакторов. М., Лесная пром-сть, 1979. 344 с.

**Suslov D. Yu., Temnikov D.O.**

#### COMPUTER SIMULATION OF THE MIXING OF THE SUBSTRATE IN BIOGAS PLANTS

*Recently in the Russian Federation observed the development of systems of alternative energy - biogas technology. At the same time to intensify the process of obtaining biogas installation equipped with heating systems and mixing. A computer model of a bioreactor with mechanical stirring of the substrate, the most widely used in biogas plants. Produced simulation of mixing biomass in the multifunctional complex ANSYS, in which determine the direction and flow rate of components under mechanical mixing method. It was established that in the top of the reactor biomass hardly moves, while at the bottom of the reactor there is a two-fold overspeed.*

**Key words:** computer modeling, mechanical stirring, bioreactor.

**Суслов Денис Юрьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: suslov1687@mail.ru

**Темников Дмитрий Олегович**, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: leovante@live.ru