

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА В БИОРЕАКТОРАХ С БАРБОТАЖНЫМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ СУБСТРАТА

---

*suslov1687@mail.ru*

**Кушев Л.А., д-р техн. наук, проф.,  
Суслов Д.Ю., канд. техн. наук, доц.**  
*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова*

**Аннотация.** Работа посвящена теоретическому исследованию процесса анаэробной ферментации и разработке аппарата для получения биогаза. Изучены физико-химические основы процесса получения биогаза. Разработана конструкция биореактора, оснащенного системой барботажного и механического перемешивания. Предложена математическая модель процесса получения биогаза в мезофильном температурном режиме. Составлен тепловой баланс биореактора, оснащенного системой барботажного перемешивания.

**Ключевые слова:** биогаз, биореактор, барботажное перемешивание, тепловой баланс.

Решение вопросов охраны окружающей среды и улучшения экологической обстановки может быть достигнуто путем утилизации органических отходов, а также вопросов ресурсосбережения за счет получения и использования возобновляемого источника энергии – биогаза.

Биогаз – это газообразный источник энергии, получаемый в результате анаэробной ферментации органических веществ различного происхождения и состава. Биогаз в основном состоит из метана ( $\text{CH}_4$ ) и углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), а так же содержит незначительное количество других газов: сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ), азот ( $\text{N}_2$ ), водород ( $\text{H}_2$ ) [1-3]. Количество биогаза, образующегося при анаэробной ферментации зависит от состава исходного субстрата [4,5]. Органические отходы различного происхождения состоят из воды и сухих веществ, при этом сухое вещество включает органическую и неорганическую составляющие части (рис. 1).

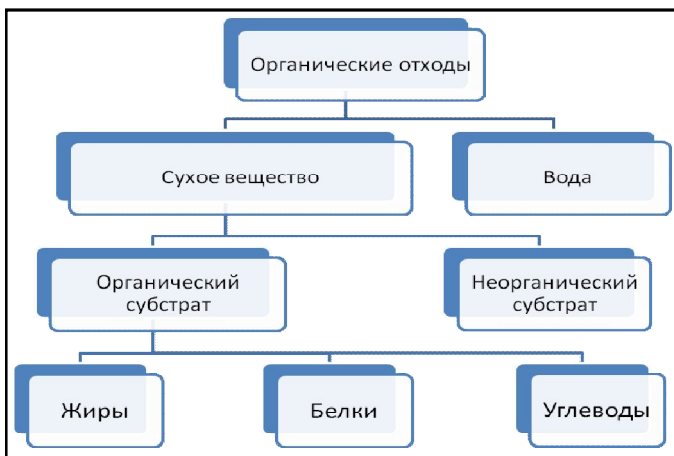


Рисунок 1 – Состав органических отходов

Неорганическая часть субстрата (зола) содержит в своем составе землю, песок, камни, металлические и другие включения, которые являются балластом исходного материала.

Органическое вещество состоит из жиров, белков и углеводов [6].

Наибольшее количество биогаза выделяется из жиров - 1250 л из килограмма органического сухого вещества (ОСВ). Белки и углеводы дают всего лишь 700 л/кг ОСВ и 790 л/кг ОСВ соответственно.

Максимальное содержание метана в составе биогаза выделяется также из жиров – 850 л/кг ОСВ или 68% от общего количества биогаза. Из белков можно получить 490 л/кг ОСВ или 71%, в то время как углеводы дают только 395 л/кг ОСВ или 50% метана в газе [5].

Таким образом, выход биогаза зависит от содержания в исходном субстрате жиров, белков и углеводов. Анализ работ отечественных и зарубежных исследователей [5-8] позволяет сделать вывод о том, что нет единого показателя выхода биогаза. Средние данные по выходу биогаза из различных видов субстратов представлены на рис.2.

Процесс получения биогаза – это биологическое разложение сложных органических соединений, происходящее в течение нескольких фаз, в результате воздействия различных групп бактерий. Согласно современным представлениям преобразование любого сложного органического вещества в биогаз проходит через четыре основные последовательные стадии [4, 9,10]:

– гидролиза;

- ацидогенеза;
- ацетогенеза;
- метаногенеза.

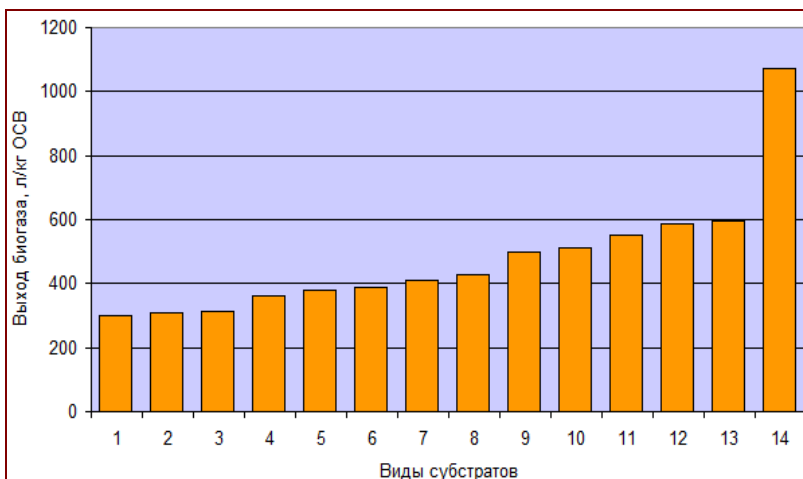


Рисунок 2 – Выход биогаза из различных видов субстратов:

- 1 – твердый навоз КРС; 2 – жидкий навоз КРС; 3 – солома; 4 – содержание желудка свиней; 5 – куриный помет; 6 – жидкий свиной навоз; 7 – листья;
- 8 – содержание желудка жвачных; 9 – ботва свеклы; 10 – бытовые отходы;
- 11 – кукурузный силос; 12 – травяной силос;
- 13 – пивная барда; 14 – жир

Однако имеются работы [11, 12], в которых рассматривается 5 стадий получения биогаза, при этом добавлена начальная стадия – дезинтеграции.

Для эффективного протекания процесса анаэробной ферментации необходимо соблюдение в биореакторе следующих условий и факторов [2-5]:

- отсутствие кислорода в биореакторе;
- поддержание оптимальной температуры биомассы;
- продолжительность процесса брожения;
- соотношение азота и углерода;
- влажность биомассы;
- степень разложения субстрата;
- перемешивание биомассы;
- соблюдение кислотно-щелочного баланса в биореакторе;
- отсутствие веществ-ингибиторов.

При этом основными факторами, определяющими этот процесс, являются: температура и влажность биомассы; способ и частота перемешивания биомассы; продолжительность процесса брожения.

Для получения биогаза применяются биогазовые установки с различными конструктивными и технологическими особенностями. При этом, конструктивно все биогазовые установки практически не отличаются друг от друга, и представляют собой герметично закрытую емкость, в которой при определенных условиях происходит сбраживание органического субстрата с образованием биогаза и биоудобрений. Основным компонентом биогазовой установки является биореактор (рис. 3), в котором протекает процесс анаэробной ферментации, также установка содержит газгольдер, системы подготовки и сбора субстрата, устройства подогрева и перемешивания, КИП и автоматики [3,6,7].

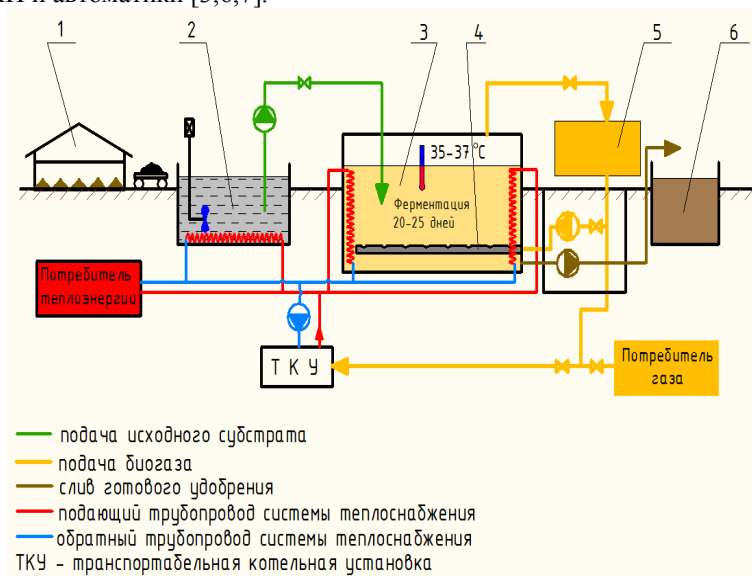


Рисунок 3 – Общая схема биогазовой установки:

- 1 – источник отходов; 2 – система подготовки субстрата; 3 – биореактор;
- 4 – система перемешивания; 5 – газгольдер; 6 – резервуар удобрения

В результате проведенного анализа конструкций биогазовых установок нами предложена оригинальная классификация установок получения биогаза. Классификация включает конструктивные и

технологические признаки всех основных элементов биогазовой установки, и учитывает как отечественные, так и зарубежные разработки. Особенностью данной классификация является то, что учтено влияние барботажного метода перемешивания на температурный режим установки (рис. 4).

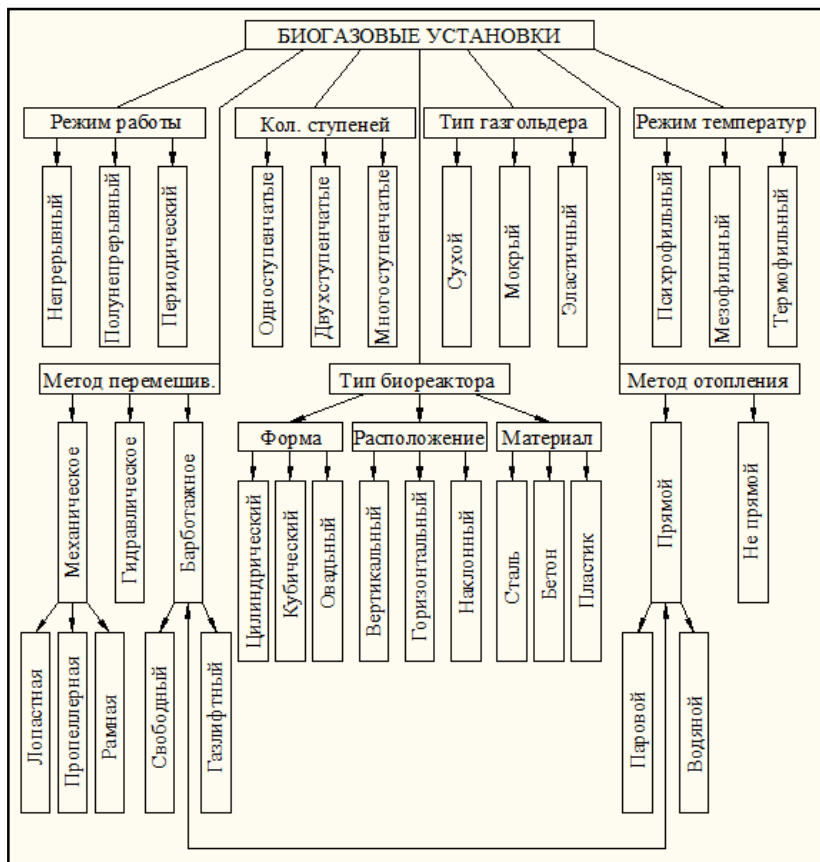


Рисунок 4 – Классификация биогазовых установок

В настоящее время для перемешивания биомассы применяются механические и барботажные системы [13-15]. Недостатком барботажных устройств является низкая эффективность перемешивания

высоковязких и густых субстратов, вследствие чего уменьшается эффективность процесса получения биогаза.

Для высоковязких субстратов целесообразно использовать механические мешалки лопастного типа, однако при их работе на поверхности биомассы наблюдается образование корки, которая препятствует выходу биогаза и замедляет процесс анаэробной ферментации.

Решение этих проблем возможно за счет использования системы перемешивания комбинированного типа. Разработан биореактор с системой перемешивания комбинированного типа, производящей механическое и барботажное перемешивание.

Биореактор для получения биогаза содержит корпус, внутри которого расположено перемешивающее устройство, состоящее из лопастей, жестко закрепленных на полом валу. Лопасти выполнены в виде полых трубок с отверстиями, сечение которых уменьшается, по ходу движения газа. Биореактор также снабжен патрубками ввода и удаления субстрата и газовым патрубком для отвода получаемого биогаза (Рис. 5).



Рисунок 5 – Биореактор комбинированного типа

Выполнен анализ работ зарубежных и российских ученых, посвященных теоретическому описанию и разработке математических

моделей процессов и аппаратов, применяемых для получения биогаза при анаэробной ферментации органических отходов, который позволил выделить основные направления развития моделирования процесса получения биогаза путем анаэробной ферментации [16-19]:

– модели, основанные на уравнениях химических реакций, протекающих при анаэробном брожении;

– модели, основанные на эмпирических уравнениях, разработанных авторами при проведении экспериментальных исследований;

– модели, основанные на кинетических зависимостях Моно и Конто, которые описывают влияние температуры и концентрации субстрата на эффективность процесса.

Из существующих уравнений, описывающих процесс получения биогаза, наибольшего внимания заслуживает кинетическая зависимость Чена и Хашимото, характеризующая скорость выхода биогаза, в зависимости от основных параметров процесса анаэробной ферментации отходов животноводства. Результаты расчетов по этой модели хорошо согласуются с экспериментальными данными, вследствие чего уравнение Чена и Хашимото легло в основу многих работ, посвященных исследованию процесса анаэробного брожения органических отходов сельскохозяйственного производства.

Для определения скорости выхода биогаза принимаем уравнение Чена и Хашимото:

$$V = \frac{B_0 \cdot S}{\tau} \cdot \left(1 - \frac{K}{\mu_m \cdot \tau - I + K}\right), \quad (1)$$

Согласно работам [1, 19], посвященным исследованию процесса получения биогаза при анаэробной ферментации органических отходов, влияние температуры на выход биогаза имеет квадратичную зависимость. Так как максимальная удельная скорость роста микроорганизмов ( $\mu_m$ ) прямо пропорциональна скорости выхода биогаза, то предложено выражение (2), представляющее зависимость максимальной удельной скорости роста микроорганизмов от температуры.

$$\mu_m = \mu_0 + \mu_1 \cdot T + \mu_2 \cdot T^2, \quad (2)$$

где  $T$  – температура биомассы в биореакторе,  $K$ ;  $\mu_0$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – дополнительные температурные коэффициенты, определяемые в результате экспериментальных данных.

Кинетический параметр ( $K$ ) определим из эмпирического уравнения, предложенного Хашимото и соавт. [19]:

$$K = 0.6 + 0.0206e^{(0.051 \cdot S)}, \quad (3)$$

Концентрация субстрата зависит от состава навоза и определяется содержанием сухого органического вещества в общем объеме бродильной массы:

$$S = \rho(100 - W) \times (100 - A) \times 10^{-4}, \quad (4)$$

где  $A$  – зольность сухого вещества навоза, %;  $W$  – влажность биомассы в биореакторе, %;  $\rho$  – плотность биомассы, кг/м<sup>3</sup>.

Биомасса представляет собой суспензию, состоящую из воды и взвешенных в нем органических и балластных частиц сухой составляющей навоза. Известно, что эффективное перемешивание субстрата во всем объеме реактора, при котором достигается наибольший выход биогаза, возможно, если объемное содержание твердого (сухого) вещества навоза не превышает 8,8-10% [15]. Поэтому принимаем влажность биомассы равной  $W=0,9$ , а объемное содержание твердой составляющей биомассы  $1-W=0,1$ . Тогда плотность бродильной массы  $\rho$  определяется соотношением:

$$\rho = W \rho_w + (1 - W) \rho_{тв}, \quad (5)$$

где  $\rho_w=1000$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воды,  $\rho_{тв}=1400$  кг/м<sup>3</sup> – плотность сухого (твердого) вещества навоза.

Вязкость биомассы зависит только от объемного содержания сухого вещества и определяется с помощью соотношения:

$$\mu = \mu_0(1 + 2,5(1 - W)), \quad (6)$$

где  $\mu_0 = 0,001$  Па·с – динамическая вязкость воды.

Для определения общего выхода биогаза при работе биореакторной установки необходимо определить общий и рабочий объемы биореактора.

Выбор рабочего объема биореактора зависит от суточного количества органических отходов, которые необходимо переработать и технологических параметров процесса, и определяется по формуле:

$$V = V_n + V_w \quad (7)$$

где  $V_n$  – объем навоза в биореакторе, м<sup>3</sup>;  $V_w$  – объем воды, необходимый для достижения требуемой влажности биомассы, м<sup>3</sup>.

Объем навоза, поступающего в биореактор, зависит от гидравлического времени удерживания биомассы в биореакторе  $\tau$  (сут) и суточного прихода навоза с фермы  $V_s$  (м<sup>3</sup>/сут):

$$V_n = \tau \cdot V_s \quad (8)$$



Объем воды, добавляемый в биореактор для достижения оптимальной влажности можно определить по формуле:

$$v_e = m_n \left( \frac{W - W_s}{100 - W} \right), \quad (9)$$

где  $W_s$  – влажность навоза поступающего с комплекса, %;  $m_n$  – масса навоза, кг.

Величина влажности навоза, поступающего со свиноводческого комплекса, зависит от способа удаления навоза и меняется в течение года, и поэтому, чаще определяется лабораторным методом. При отсутствии возможности определения, влажность свиного навоза принимается  $W_s=65\%$  [20].

С целью эффективной и устойчивой работы установки общий объем биореактора  $v_B$  определяем из выражения (10), учитывая свободный объем, необходимый для сбора и хранения биогаза [4].

$$v_B = 1,4 \cdot v, \quad (10)$$

Учитывая уравнения (1) и (7), выход биогаза  $V_{общ}$  ( $m^3/сут.$ ) с определенного объема биореактора составляет:

$$V_{общ} = V \cdot v, \quad (11)$$

При этом удельный выход биогаза  $Q_{y0}$  ( $m^3/кг$ ) определяется из выражения:

$$Q_{y0} = \frac{V}{d} \quad (12)$$

Продифференцировав уравнение (11) получим:

$$\frac{dV'}{d\tau} = V \cdot v, \quad (13)$$

где  $V'$  – объем биогаза,  $m^3$ .

Полученные выражения (11), (12) и (13) позволяют определить суточный и удельный выход биогаза, а также общий объем получаемого биогаза с определенного объема биореактора.

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность процесса получения биогаза, является температура бродильной массы в биореакторе, так как процесс анаэробной ферментации очень чувствителен к перепадам температуры [21].

Составим схему и уравнение теплового баланса для биореактора получения биогаза с ботажным перемешиванием биомассы (рис. 6).

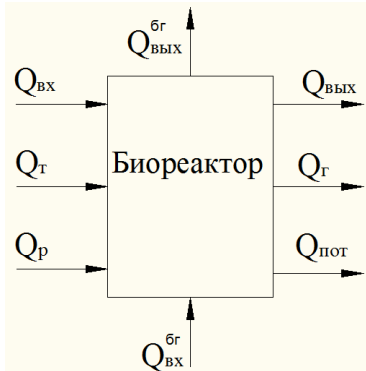


Рисунок 6 – Схема теплового баланса биореактора

Уравнение теплового баланса в общем виде с учетом потерь теплоты в окружающую среду выражается равенством:

$$\sum Q_{np} = \sum Q_{расх} + Q_{ном} \quad (14)$$

где  $Q_{np}$  – количество тепла, вносимого в аппарат, Вт;  $Q_{расх}$  – количество тепла, уносимого из аппарата, Вт;  $Q_{ном}$  – количество тепла, теряемого в окружающую среду, Вт.

Количество тепла, вносимого в биореактор, определяется выражением:

$$\sum Q_{np} = Q_{ax} + Q_{ax}^{\delta z} + Q_p + Q_m \quad (15)$$

где  $Q_{ax}$  – количество тепла, поступающего с исходным субстратом, Вт;  $Q_{ax}^{\delta z}$  – количество тепла, поступающего с барботажным биогазом, Вт;  $Q_p$  – количество тепла, выделяющегося в процессе экзотермической реакции анаэробной ферментации, Вт;  $Q_m$  – количество тепла, передаваемое теплоносителем, Вт.

Количество тепла, уносимого из биореактора, определяется выражением:

$$\sum Q_{расх} = Q_{вых} + Q_z + Q_{вых}^{\delta z} \quad (16)$$

где  $Q_{вых}$  – количество тепла, уходящего с переработанной биомассой, Вт;  $Q_z$  – количество тепла, уходящего с производимым биогазом, Вт;  $Q_{вых}^{\delta z}$  – количество тепла, уходящего с барботажным биогазом, Вт.

Используя уравнения (14-16) определим тепловую нагрузку биореактора:

$$Q_t = Q_{вых} + Q_z + Q_{вых}^{\delta z} + Q_{ном} - Q_{ax} - Q_{ax}^{\delta z} - Q_p \quad (17)$$

Полученное уравнение теплового баланса позволяет определить тепловую нагрузку и конструктивные размеры теплообменного оборудования.

**Выводы.** Изучены физико-химические основы процесса получения биогаза, определены условия и факторы, оказывающие наибольшее влияние на эффективность процесса получения биогаза.

Разработана конструкция биореактора комбинированного типа, оснащенного системой барботажного и механического перемешивания.

Разработана математическая модель процесса получения биогаза в мезофильном температурном режиме. На основе этой модели получены выражения для определения максимальной удельной скорости роста микроорганизмов и скорости выхода биогаза.

Составлен тепловой баланс биореактора, оснащенного системой барботажного перемешивания, позволяющий определить конструктивные и технологические параметры теплообменного оборудования биореактора.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-48-08039 «р\_офи\_м».*

#### **Список литературы:**

1. Гюнтер Л.И., Гольдфраб Л.Л. Метантенки. М.: Стройиздат, 1991. 128 с.
2. Веденеев А.Г., Веденева Т.А. Руководство по биогазовым технологиям. «ДЭМИ», 2011. 84 с.
3. Суслов Д.Ю. Получение биогаза в биореакторе с барботажным перемешиванием: диссертация ... канд. техн. наук / Ивановский государственный химико-технологический университет. Белгород, 2013.
4. Руководство по биогазу. От получения до использования / Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). Район Гюльцов Хофплатц 1, 18276 Гюльцов-Прюцен Германия, 2010. 213 с.
5. Эдер Б., Шульц Х. Биогазовые установки, практическое пособие. 1996. Перевод с немецкого Zorg Biogas в 2008 г.
6. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз. Теория и практика (Пер. с нем. и предисловие М.И. Серебряного). М.: Колос, 1982. 148 с.
7. Ковалев А.А. Технологии и технико-энергетическое обоснование производства биогаза в системах утилизации навоза животноводческих ферм: дис... д-ра техн. наук. М., 1998. 244 с.

8. Корзникова М.В. Стратегические аспекты устойчивого управления отходами животноводства и птицеводства в целях минимизации негативного воздействия на окружающую среду: дис...канд. техн. наук. М., 2006. 137 с.
9. Шеина О.А., Сысоев В.А. Биохимия процесса производства биогаза как альтернативного источника энергии / Вестник ТГУ. Т.14, вып.1. 2009. С. 73-76.
10. Имад Саад Саиед Белаль Разработка мероприятий по повышению эффективности использования биогаза в условиях Республики Судан: дис... канд. техн. наук. М., 2007. 188 с.
11. Batstone D. J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S. V., Pavlostathis S. G., Rozzi A., Sanders W. T. M., Siegrist H., Vavilin V. A., 2000. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology*. Vol. 45, No.10, 65–73.
12. Калюжный С.В. Высокоинтенсивные анаэробные биотехнологии очистки промышленных сточных вод // Катализ в промышленности. 2004. №6. С. 42-50.
13. Костромин Д.В., Медяков А.А., Яблонский Р.В. Биогазовая установка для исследования каталитических и барботажных процессов при анаэробной переработке органических отходов в АПК / Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса. №2(26). С. 1-5.
14. Karim K., Klasson K. T., Hoffmann R., Drescher S. R., DePaoli D. W., Al-Dahhan M. H. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mixing. *Bioresource Technology*. 2005. 96(14). С. 1607–1612.
15. 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.
16. Buswell A. M., Mueller H. F. Mechanism of Methane Fermentation. *Industrial and Engineering Chemistry*. 1952. Vol. 44. No. 3. С. 550–552.
17. Minott S.T. Feasibility of fuel cells for energy conversion on the dairy farm. Thesis. Cornell University, Ithaca, NY. 2002.
18. Hobbs P. J., Johnson R., Chadwick D. A novel technique to determine organic processes in pig waste. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1999. 79. С. 199-205.
19. Hashimoto A. G. Methane from Cattle Waste: Effects of Temperature, Hydraulic Retention Time, and Influent Substrate Concentration on Kinetic Parameter. *Biotechnology and Bioengineering*. 1982. Vol. 24. С. 203 – 2052.
20. Практическое руководство для сельскохозяйственных предприятий по охране окружающей среды / Афанасьев В.Н., Суханов П.А., Афанасьев А.В., Максимов Д.А., Перцович А.Ю. / Под ред. В.Н. Афанасьева. СПб.: СЗНИИМЭСХ. 2005. 272 с.

21. Суслов Д.Ю., Темников Д.О. Тепловой баланс биореактора с барботажным перемешиванием биомассы / Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. №1. С. 182-185.