

УДК 628.385

UDC 628.385

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНО -  
ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРИ  
АНАЭРОБНОМ СБРАЖИВАНИИ ОТХОДОВ  
ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ**

**RESEARCH OF CONVECTIVE INDUCTION  
HEATING IN ANAEROBIC FERMENTATION  
OF ANIMAL FARMS WASTE**

Вохмин Вячеслав Сергеевич  
аспирант  
*ФГОУ ВПО Ижевская государственная  
сельскохозяйственная академия, Ижевск, Россия*

Vohmin Vyacheslav Sergeevich  
postgraduate student  
*FSEI HPE Izhevsk State Agricultural Academy,  
Izhevsk, Russia*

В статье рассмотрено влияние конвективно-индукционного нагрева на жизнедеятельность метанобразующих бактерий при различных температурных режимах. Предложен интенсивный способ утилизации отходов животноводческих ферм в едином цикле, с получением нетрадиционного источника энергии

The influence of convective induction heating on methane producing bacteria vital functions at various temperature modes is studied. The intensive way of recycling of animal farms waste in a unified process at the same time with obtaining alternative energy is offered

Ключевые слова: ОТХОДЫ, ТЕХНОЛОГИЯ, УСТАНОВКА, ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ, БИОГАЗ, ПСИХРОФИЛЬНЫЙ, МЕЗОФИЛЬНЫЙ, ТЕРМОФИЛЬНЫЙ, ТЕМПЕРАТУРА, ЭНЕРГОНОСИТЕЛЬ

Keywords: WASTE, TECHNOLOGY, INSTALLATION, INDUCTION HEATING, BIOGAS, PSYCHROPHILIC, MESOPHILIC, THERMOPHILIC, TEMPERATURE, ENERGY CARRIER

Ежегодное количество органических отходов в сельскохозяйственном производстве Российской Федерации составляет 250 млн. тонн из них 150 млн. тонн приходится животноводство и птицеводство, 100 млн. тонн на растениеводство в пересчете на абсолютно сухое вещество. Технологии утилизации отходов животноводства существует тысячи лет. Концентрация огромного количества сельскохозяйственных животных и птицы на ограниченных площадях в современных условиях требует применения промышленных технологий утилизации отходов с получением товарной продукции[1].

Проблема утилизации органических отходов является одной из актуальной задач, стоящих перед работниками сельскохозяйственных предприятий.

Собственный энергоноситель - биогаз, полученный в результате анаэробной обработки отходов, может быть преобразован в тепло или

электричество, напрямую использован в газовых приборах. Высокоэффективное готовое органическое удобрение для собственных нужд или на продажу. В результате, биотехнологии не только снижают затраты на производство, но и создают полезные продукты, востребованные на рынке и приносящие прибыль[3].

Вообще-то образование метана идет в достаточно широком интервале температур (8...60° С), при этом при определенных температурах в процессе сбраживания участвуют определенные виды бактерий.

Выделение биогаза происходит уже при 4°С, но обычно различают три характерных уровня температур, предпочтительных для отдельных видов бактерий. Психрофильный режим идет при температуре 8...20° С, мезофильный - при 25...40° С, термофильный - при 45...60° С. Более производительны термофильный и мезофильный режимы сбраживания, однако все три режима имеют как свои преимущества, так и недостатки. Режимы с более высокими температурами требуют больших затрат энергии на поддержание оптимальной температуры, зато здесь благодаря сокращению продолжительности сбраживания удается значительно сократить объем биореактора и таким образом увеличить производительность биогазовой установки [5]. В соответствии с законом Аррениуса скорость процессов ферментации возрастает с увеличением температуры вплоть до 60 °С - максимальной для практической реализации метанового брожения. При температуре 35 °С скорость газовыделения вдвое выше, чем при 26 °С[6].

Более совершенными сооружениями для сбраживания осадков являются метантенки. Сокращение сроков сбраживания в них за счет искусственного подогрева приводит к значительному уменьшению объема сооружений. В настоящее время метантенки широко применяются в отечественной и зарубежной практике.

Как уже выше было оговорено, что в зависимости от температуры, при которой происходит брожение различают три типа процесса - психрофильное сбраживание, мезофильное сбраживание и термофильное сбраживание. Наиболее приоритетными считается мезофильное и термофильное сбраживание.

За рубежом в основном применяется мезофильный процесс. В РФ наряду с мезофильным сбраживанием широкое распространение получил и термофильный процесс[2].

Под индукционным нагревом вещества понимается нагрев при бесконтактной передаче энергии в нагреваемое электропроводящее тело с помощью переменного электромагнитного поля, создаваемого индуктором.

Передача электрической энергии от индуктора к нагреваемому телу основана на законе электромагнитной индукции, а превращение ее в тепловую – на законе Джоуля-Ленца[4].

В металлическом теле, помещенном внутрь индуктора, через который пропускается переменный ток, изменяющееся магнитное поле вызывает появление ЭДС индукции[4].

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где  $e$  и  $\Phi$  – мгновенные значения ЭДС и магнитного потока соответственно.

При синусоидальном изменении магнитного потока с частотой  $f$  эффективное значение индуктированной ЭДС будет равно

$$E = 4,44 \cdot f \cdot \omega \cdot \Phi_m, \quad (2)$$

где  $\Phi_m$  – амплитудное значение магнитного потока, Вб;  $f$  - частота, Гц.

Тогда мощность можно определить из выражения:

$$P = E \cdot I \cdot \cos\varphi = 4,44 \cdot f \cdot \omega \cdot I \cdot \Phi_m \cdot \cos\varphi \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что мощность  $P$  при прочих равных условиях пропорциональна частоте. Поэтому при повышении частоты увеличивается энергия, выделяющаяся в том же самом объеме, т.е. увеличивается ее концентрация. Именно этим и объясняются малые размеры и вес высокочастотных трансформаторов, а также применение более высоких частот при нагреве малых объемов[4].

Индуктированные и циркулирующие в поверхностных слоях тела вихревые токи вызывают его нагрев. Поэтому значение и характер распределения выделяющейся мощности в нагреваемом теле зависят от его электромагнитных свойств (электрического сопротивления и магнитной проницаемости), а наличие электропроводящих свойств материала тела является обязательным условием индукционного нагрева[4].

Объектом исследований является трехстадийный процесс работы биогазовой установки. Схема опытной установки представлена на рисунке 1.

В состав установки входит: трехстадийный метантенк с конвективно-индукционным нагревателем, шланги, манометр, жидкостный манометр, счетчик электрической энергии, термодатчики, емкость для сбора газа, отверстие для залива субстрата, сливной патрубков, емкость под перебродивший шлам. В реактор загружается биомасса, состоящая коровьего навоза и катализатора, в качестве которого используется болотная жидкость. В результате брожения образуется биогаз, поступающий по шлангу в водный затвор, выход которого контролируется жидкостным манометром.

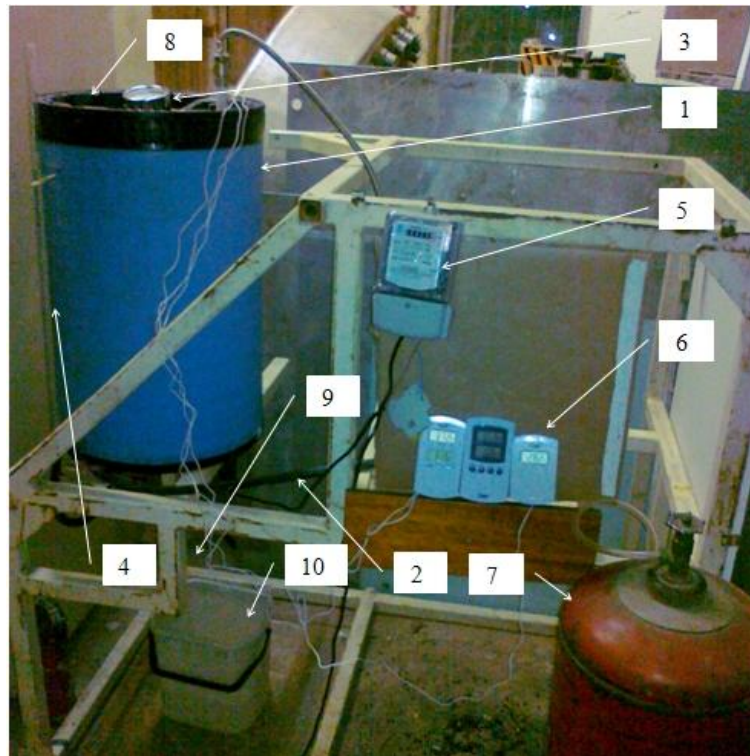


Рисунок 1 – Опытная установка для проведения экспериментальных опытов трех стадий метанового сбраживания с конвективно-индукционным нагревом: 1 – трехстадийный метантенк с конвективно - индукционным нагревателем; 2 - Шланги; 3 – Манометр; 4 – Жидкостный манометр; 5 - Счетчик электрической энергии; 6 - термодатчики; 7 - Емкость для сбора газа; 8 - отверстие для залива субстрата; 9 - сливной патрубков; 10 - емкость под перебродивший шлам

В период проведения исследований в ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА проводились эксперименты с коровьем навозом в качестве образца, так как известно, что данный вид экскрементов наиболее продуктивен по выходу биогаза.

На первом этапе при конвективно-индукционном нагреве на лабораторной установке получены экспериментальные зависимости выхода биогаза и температуры от продолжительности процесса и режимов сбраживания.

Полученные данные при различных режимах сбраживания с данными образцами представлены на рисунках 2, 3, 4. На рисунке 2

показана динамика получения биогаза от времени сбраживания: а) при температуре 8 °С б) при температуре 25 °С:

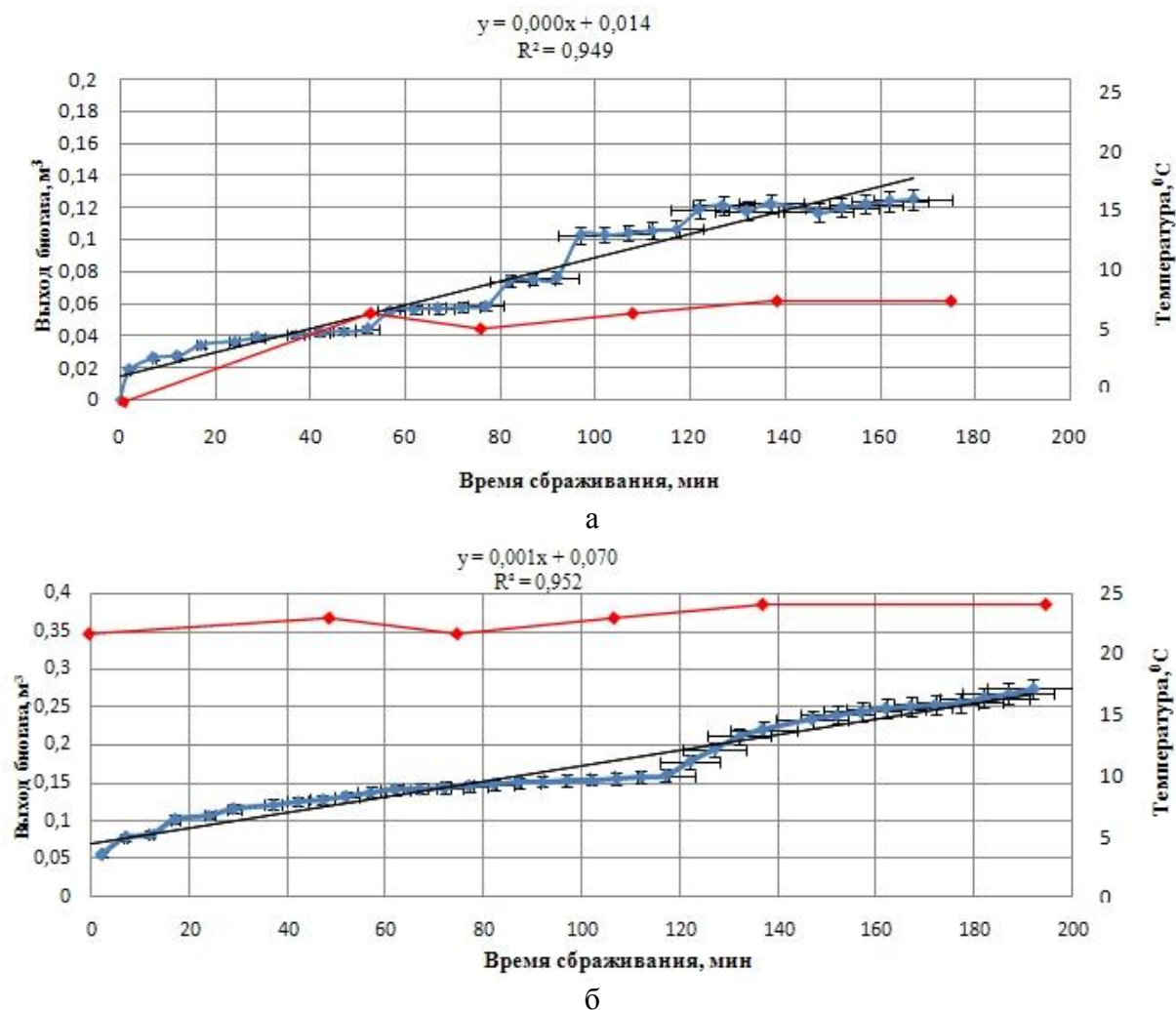
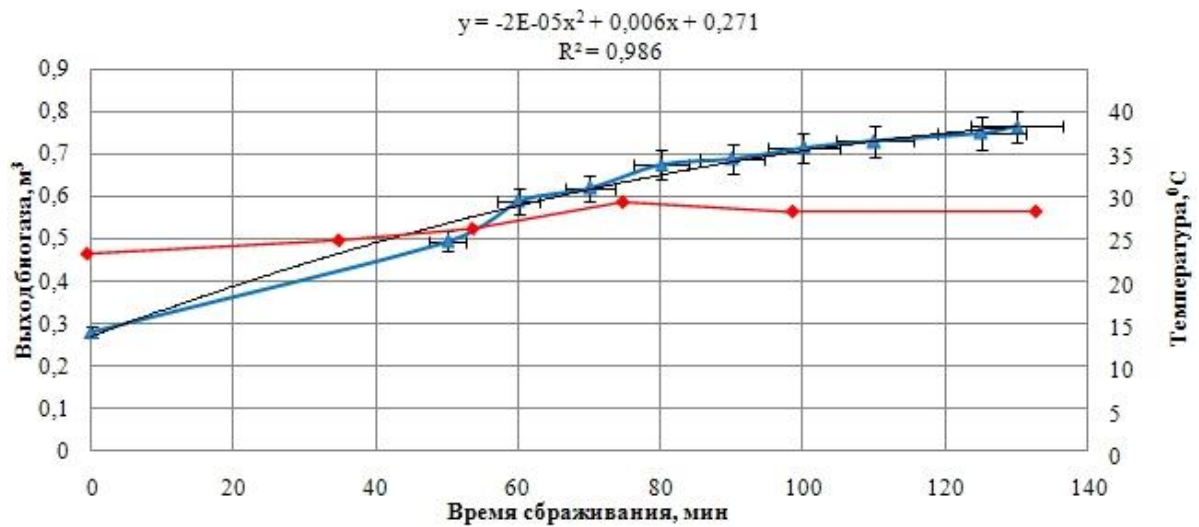


Рисунок 2 - Динамика получения биогаза при психрофильном режиме: а) при температуре 8 °С б) при температуре 25 °С

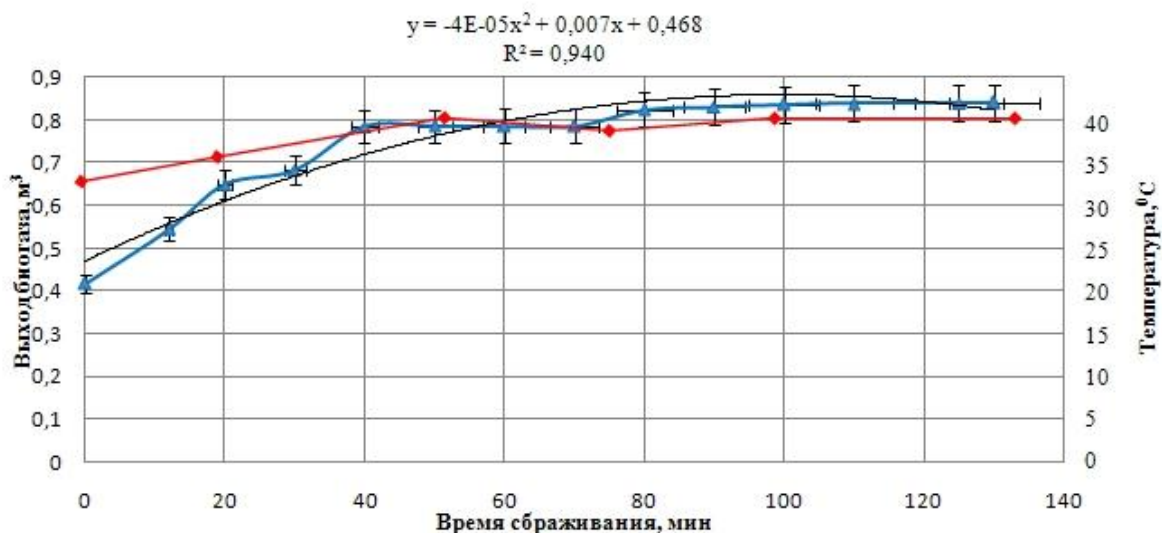
В ходе проведения опыта получили, что при психрофильном режиме процесс образования биогаза слабо выражен, что видно из полученных данных на рисунках. Процесс протекает линейно, с малой интенсивностью. Температура в данном режиме повышается медленно и непрерывно.

Далее проводились экспериментальные исследования, при мезофильном режиме сбраживания они показали, что при повышении температуры, интенсивность выхода биогаза увеличивается. Результаты опытов приведены на рисунке 3, где показана динамика получения биогаза

от времени сбраживания: а) при температуре 28 °С б) при температуре 40°С:



а



б

Рисунок 3 - Динамика получения биогаза при мезофильном режиме: а) при температуре 28 °С б) при температуре 40°С

В ходе проведения опыта получили, что при мезофильном режиме процесс образования биогаза имеет ярко выраженный характер, что видно из полученных данных на рисунках. Процесс имеет полиномиально - линейную форму, с хорошей интенсивностью. Температура в данном режиме повышается непрерывно и интенсивнее, чем в психрофильном режиме.

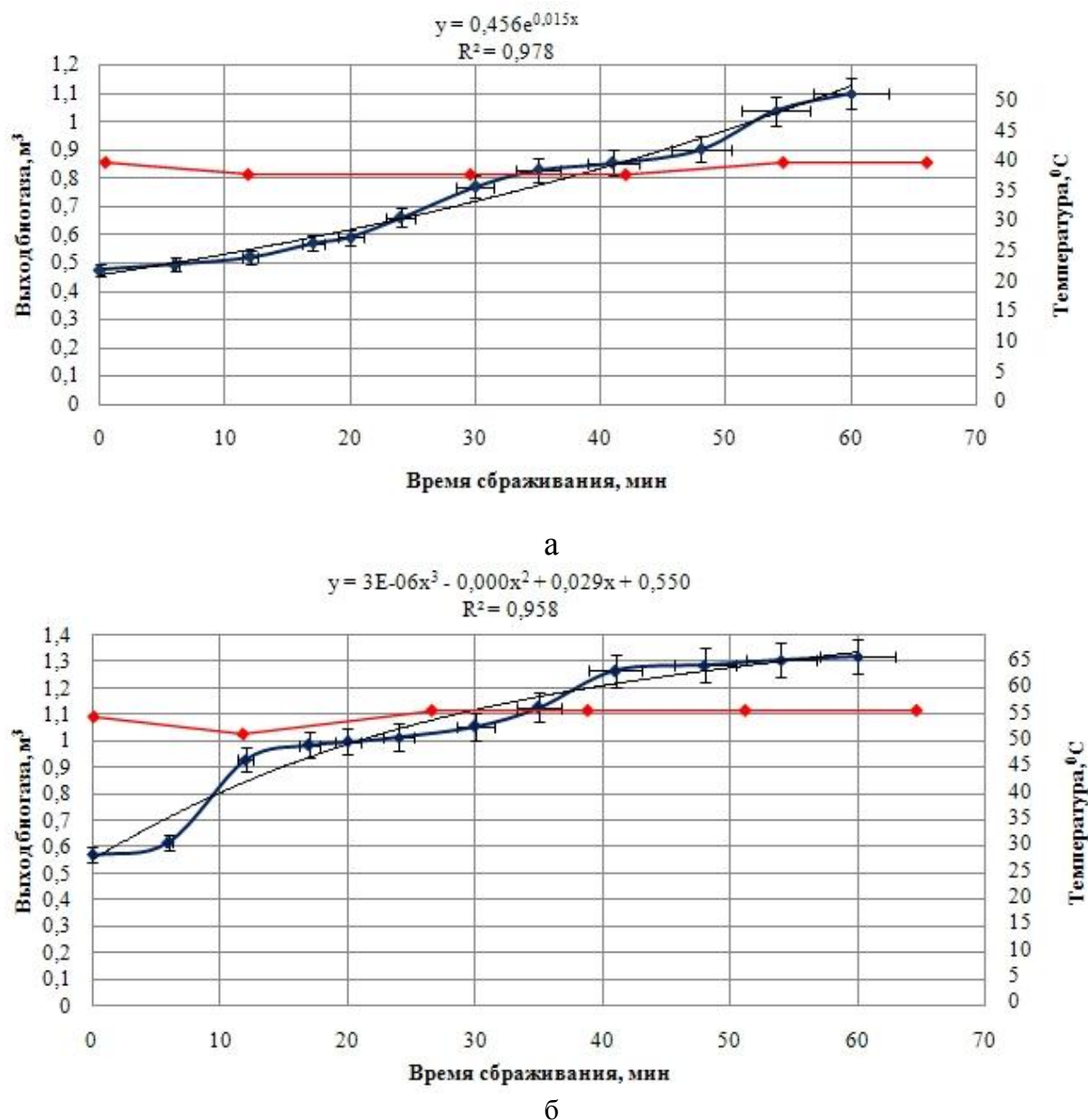


Рисунок 4 - Динамика получения биогаза при термофильном режиме: а) при температуре 43 °С б) при температуре 55 °С

Проведенные экспериментальные исследования при термофильном режиме сбраживания показали, что при дальнейшем повышении температуры до 60 °С, интенсивность выхода биогаза максимально увеличивается. Дальнейшее повышение температуры приводит к снижению выхода биогаза, налипанию субстрата на нагревательный элемент и повышению энергопотребления установки. Результаты опытов приведены на рисунке 4, где показана динамика получения биогаза от времени сбраживания: а) при температуре 43 °С б) при температуре 55 °С.



В ходе проведения опыта получили, что термофильный режим по образованию биогаза имеет максимально интенсивный характер, что видно из полученных данных на рисунках.

Анализ проведенных опытов с коровьим навозом, представленных на рисунках 2, 3, 4, показал, что наиболее лучший по интенсивности выхода биогаза термофильный режим. Так же установлено, что процесс образования биогаза происходит во всех режимах сбраживания, с диапазонами температур 8 – 60°C. Чем выше температура сбраживания, тем больше потребление электроэнергии. Следовательно, нужно интенсифицировать процесс нагрева субстрата.

Проведенные эксперименты показали, что объединение режимов сбраживания в единый цикл (реактор) трех стадий метанового сбраживания возможно, при условии использования ректора объединяющего стадии метанового сбраживания.

На рисунке 5 показана кинетика выделения биогаза в зависимости от температуры и времени сбраживания коровьего навоза, а также нагрев в трех режимах сбраживания.



Рисунок 5 – Сравнительный кинетический анализ выделения биогаза в зависимости от температуры и времени сбраживания в едином цикле сбраживания

Анализируя полученные данные и графики на рисунке 5, выявили основные подходы к методам интенсификации процесса нагрева. Интенсификация за счет равномерного объемного разогрева метантенка до 55°С и объединения трех стадий сбраживания в единый цикл позволит потери тепла высокотемпературной зоны использовать для нагрева субстрата предыдущих стадий, что сократит время нагрева навоза при экономии энергии на разогрев. Выявили положительное влияние использования конвективно-индукционного нагрева.

Опыт показал, что применение частоты 50 Гц в индукторе возможно для конвективно-индукционного нагрева метантенка, так как ряд особенностей заставляет выделить частоту 50 Гц отдельно, хотя основные закономерности и методы расчета те же, что и на средних частотах.

Главным преимуществом использования частоты 50 Гц являются:

- снижение расхода энергии и капитальных затрат в связи с отсутствием преобразователя частоты;
- уменьшение времени нагрева[4].

На основании анализа состояния вопроса, теоретических и лабораторных исследований определяем, что непрерывный процесс переработки навоза при объемном конвективно - индукционном излучении, включает в себя комплекс взаимосвязанных сложных теплофизических процессов:

- дозированная загрузка отходов;
- нагрев биомассы;
- периодическое перемешивание;
- дозированная выгрузка переработанного субстрата;
- сбор и резервирование газа.

Все указанные процессы достаточно мало изучены и поэтому их разработка представляет самостоятельный научный и практический интерес.

За критерии оптимизации принимаем максимальный выход биогаза и минимизацию затрат энергии. На основе теоретических и экспериментальных данных разрабатываем схему физической модели процесса метанового сбраживания навоза с конвективно - индукционным нагревом, которая представлена на рисунке 6.

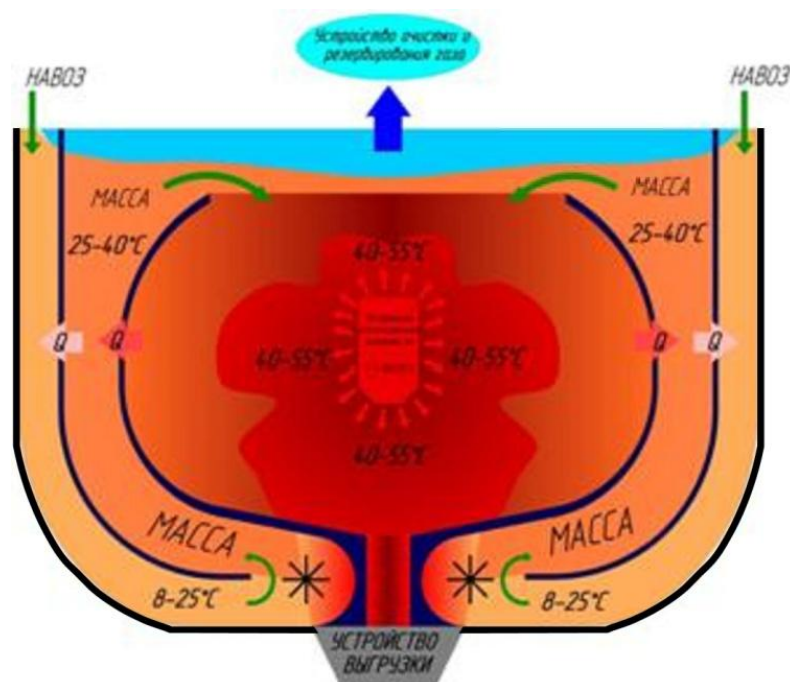


Рисунок 6 – Схема физической модели процесса метанового сбраживания

Схема физической модели процесса непрерывного метанового сбраживания с конвективно - индукционным нагревом разработана так, что высокотемпературная (термофильная) зона находится в центральной части метантенка, при этом температура центральной зоны разогревает мезофильную и психрофильную зоны за счет конструктивных элементов реактора, а именно сужение зоны выгрузки переработанного навоза, приводит к интенсивным теплофизическим процессам передачи тепла вновь поступающему сырью. Также разогрев биомассы осуществляется

контактным нагревом через перегородки, разделяющие эти зоны, и диффузии субстрата.

В период нагрева навоза температура в центральной части биореактора увеличивается до  $55^{\circ}\text{C}$  и поддерживается постоянной в заданном режиме, далее происходит конвективный нагрев с соседними секциями метантенка. Это распределение тепла происходит равномерно по всему объему реактора.

В схеме физической модели процесса метанового сбраживания идет непрерывный процесс газообразования, так как присутствуют все стадии анаэробной переработки навоза.

Конвективно-индукционный нагрев является самым подходящим для этой технологии переработки навоза, так как нагрев субстрата равномернее, идет мгновенное выделение тепла ко всему обрабатываемому субстрату.

В результате исследований получили следующие выводы:

- выявили эффективность применения индукционного нагрева для технологии переработки навоза, в качестве параметра режима, определяющего внутренний нагрев навоза, можно принимать мощность конвективно - индукционного излучения;

- обосновали и доказали применение объемного конвективно-индукционного нагрева для разрабатываемой формы метантенка, объединение в единый цикл (реактор) трех стадий метанового сбраживания, и выявлены основные режимы сбраживания (психрофильный при  $8...25^{\circ}\text{C}$ , мезофильный при  $25...40^{\circ}\text{C}$  и термофильный при  $40...55^{\circ}\text{C}$ );

- получили, что конвективно - индукционная энергия эффективна для режимов сбраживания в едином цикле, а мощность конвективно - индукционного излучателя определяет продолжительность сбраживания.

Литература

1. Альтернативная энергетика.- М.,[2008]. – Режим доступа:  
<http://www.medianapm.ru/biogaz.htm>.
2. Зависимость продолжительности сбрасывания осадка от температуры брожения.- М.,[2008]. – Режим доступа: <http://www.clickpilot.ru/canaliz.php?wr=254>
3. Комплекс по переработке и утилизации органических отходов.- Режим доступа:  
<http://www.koud.ru/>.
4. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева/ А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин.- Л.: «Энергия», 1974. – 264с.
5. Устройство и принцип работы биогазовой станции.- М.,[2011]. – Режим доступа:  
[www.zorgbiogas.ru](http://www.zorgbiogas.ru)
6. Технология и аппаратура искусственной биологической очистки.- М.,[2007]. – Режим доступа: [http://www.sergeyosetrov.narod.ru/Documents/Waste\\_from\\_food\\_ind\\_plant\\_3.htm](http://www.sergeyosetrov.narod.ru/Documents/Waste_from_food_ind_plant_3.htm).