

## Эффективность технологии анаэробного получения биоэнергетического топлива

**Качан Ю.Г., Курис Ю.В., Левицкая И.Н.**

*Запорожская государственная инженерная академия*

Представлены результаты исследований в области анаэробного сбраживания. Показано влияние некоторых факторов на метанообразование. Выведено экспоненциальное уравнение количества выхода биогаза от содержания сухого органического вещества. Показано, что технология анаэробной переработки твердого навоза с разбавлением его жидкой фракцией сброженного осадка позволяет повысить выход биогаза на 55–70 % и снизить затраты энергии на технологический процесс в 1,2–1,7 раза в зависимости от влажности.

**Ключевые слова:** биогаз, анаэробное сбраживание, метаногенез.

Представлено результати досліджень у галузі анаеробного зброджування. Показано вплив деяких факторів на метаноутворення. Виведено експоненціальне рівняння кількості виходу біогазу від вмісту сухої органічної речовини. Показано, що технологія анаеробної переробки твердого гною з розбавленням його рідкою фракцією зброженого осаду дозволяє підвищити вихід біогазу на 55–70 % та знизити витрати енергії на технологічний процес у 1,2–1,7 рази у залежності від вологості.

**Ключові слова:** біогаз, анаеробне зброджування, метаногенез.

Возникновение и обострение экологических проблем, рост цен на энергоресурсы обусловили значительный интерес к использованию технологии биоконверсии органических отходов для получения энергии.

Животные плохо усваивают энергию растительных кормов, и более половины этой энергии используется непроизводительно — уходит в навоз. Это позволяет рассматривать последний не только как ценное сырье для органических удобрений, но и как мощный возобновляемый источник энергии.

В последние годы положение в сельском хозяйстве с энергетическим сырьем принципиально изменилось. Острый дефицит энергии обусловил ускоренное осуществление научно-исследовательских программ, направленных на практическое использование дополнительных местных ресурсов топлива. При таких обстоятельствах проблематика по переработке навоза в биогаз выдвигается на передний план. Причины, ведущие к обновлению интереса к анаэробному сбраживанию, выходят за рамки, ограниченные исключительно энергетическим обоснованием.

Переход животноводства на промышленную основу и связанная с этим концентрация животных на крупных фермах и комплексах обусловили резкое увеличение навозных стоков, которые должны утилизироваться, не загрязняя окружающую среду. Один из путей ра-

циональной утилизации навоза и навозных стоков животноводческих ферм — их анаэробное сбраживание, которое обеспечивает обезвреживание навоза и сохранение его как удобрения при одновременном получении локального источника энергии — биогаза. Интерес к получению только биогаза сменился пониманием значения этого процесса для экологии как энерго-сберегающего процесса обработки навоза и очистки навозных стоков.

В мире разработано и построено более тысячи крупных промышленных установок для переработки навоза сельскохозяйственных животных в биогаз. В Украине они пока не получили широкого распространения, за исключением нескольких опытно-промышленных установок, разработанных в соответствии с государственными программами, составленными на основе предварительных испытаний биогазовых установок и предусматривающими замещение жидкого топлива биогазом.

Однако ожидаемого замещения пока не состоялось. Причин довольно много. Это недостаточная изученность процесса, отсутствие научно обоснованных методов построения технологических линий для производства биогаза, отсутствие данных об энергетическом балансе биогазовых установок и их эффективности и то, что программы были составлены без учета фактических условий и возможностей применения анаэробного сбраживания на фермах.

Анализ литературных источников показывает, что биогазовые установки разрабатывались без учета их использования в технологических линиях утилизации навоза, а получение биогаза рассматривалось без взаимосвязи с параметрами установок и температурой окружающей среды. В результате возникли явные противоречия между теорией процесса анаэробного сбраживания навоза с получением биогаза и методами построения и расчета технических средств для его осуществления. Применяемые методики основаны на использовании эмпирических моделей и не дают полного представления об энергобалансе производства биогаза.

Имеющиеся сведения о затратах энергии на собственные нужды процесса в сопоставлении с энергией полученного биогаза носят конкретный характер. Они не могут быть использованы для оценки энергобаланса производства биогаза из навоза с различными физико-механическими свойствами в разных природно-климатических зонах.

Отсутствие достоверных данных об энергетическом балансе биогазовых установок и методов экономической оценки не позволяет объективно судить об их эффективности, что сдерживает вовлечение в народное хозяйство страны энергетического потенциала навоза сельскохозяйственных животных.

Биогаз представляет собой газовую смесь, которая образуется из органических веществ в результате анаэробного и микробиологического процессов. Он состоит из 50–70 %  $\text{CH}_4$ , 30–40 %  $\text{CO}_2$  и небольшого количества  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  [1, 2]. Содержание энергии в биогазе напрямую зависит от количества метана. В связи с достаточно высоким содержанием метана биогаз можно использовать в качестве источника энергии для производства электричества и тепла. Из 1 м<sup>3</sup> метана можно получить 9,94 кВт·ч электроэнергии. Если предположить, что в биогазе содержится 60 % метана, то из 1 м<sup>3</sup> биогаза можно получить около 6 кВт·ч электроэнергии [1, 2].

Биологическое образование метана — естественный природный процесс, который протекает везде, где во влажной и без доступа кислорода среде под действием метанобразующих бактерий разлагается органический материал. Установлено, что деградация органических веществ при метаногенезе осуществляется как многоступенчатый процесс, в котором углеродные связи постепенно разрушаются под действием различных групп микроорганизмов.

Согласно современным воззрениям, анаэробное превращение любого сложного органического вещества в биогаз проходит четыре последовательные стадии (рис.1).

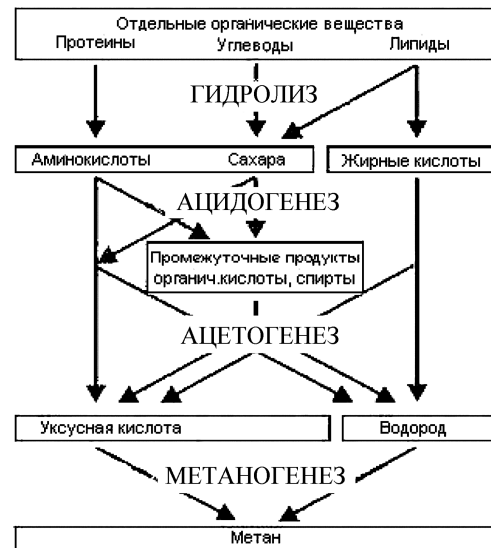


Рис.1. Схема образования биогаза.

**Гидролизная фаза.** Во время протекания этой фазы в результате жизнедеятельности бактерий устойчивые субстанции (протеины, жиры и углеводы) разлагаются на простые составляющие (аминокислоты, глюкоза, жирные кислоты).

**Кислотообразующая фаза.** Образованные во время предыдущей фазы простые составляющие разлагаются на органические кислоты (уксусная, пропионовая, масляная), спирт, альдегиды, водород, диоксид углерода, аммиак и сероводород. Этот процесс протекает до тех пор, пока развитие бактерий не замедлится под воздействием образованных кислот.

**Ацетогенная фаза.** Под воздействием ацетогенных бактерий из образованных во время рассмотренной выше фазы кислот вырабатывается дополнительно уксусная кислота.

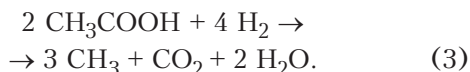
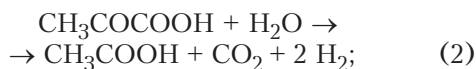
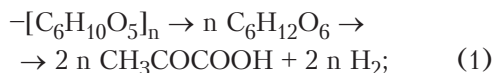
**Метаногенез.** Уксусная кислота разлагается на метан, углекислый газ и воду. Водород и углекислый газ преобразуются в метан и воду.

В метаногенном сообществе между группами микроорганизмов существуют тесные и сложные взаимосвязи, в том числе обратные; реакции протекают одновременно, причем метанобразующие бактерии предъявляют к условиям своего существования более высокие требования, чем кислотообразующие. Ввиду субстратной специфичности метаногенов их развитие без трофической связи с бактериями предыдущих стадий невозможно.

Весь этот сложный комплекс превращений осуществляет большое непрогнозируемое количество микроорганизмов, по некоторым оценкам, до нескольких сотен видов бактерий. Количественный и качественный составы микрофлоры сильно зависят от состава сбраживаемых органических веществ и условий, которые создаются в

окружающей среде. Брожение осуществляется вследствие протекания нескольких тысяч химических реакций, повлиять на ход каждой из которых практически невозможно. Возможно лишь представить детальную схему метаногенеза, отражающую потоки углерода при деградации сложных органических веществ [3, 4].

Скорость гидролиза полисахаридов зависит от их типа. Крахмал гидролизуется относительно легко, целлюлоза в сочетании с лигнином может разлагаться очень медленно или не разлагаться совсем. Образовавшиеся моносахариды подвергаются дальнейшему разложению под действием ферментов до пируватов, а затем до разных продуктов, основными из которых являются уксусная кислота и водород. Под действием других микроорганизмов происходит превращение этих продуктов в диоксид углерода и метан:



Метаногенные организмы очень легко поддаются самоотравлению, в результате чего прекращается их рост и происходит накопление диоксида углерода, водорода, ацетатов и пропионатов.

Белки разлагаются в реакторах до аминокислот и олигопептидов, которые могут дезаминироваться до аммиака или войти в состав живой биомассы. Может также произойти расщепление небелковых азотистых соединений до кислот, диоксида углерода и аммиака.

Жиры расщепляются вследствие гидролиза на глицерол и жирные кислоты. Уксусная кислота и водород, образовавшиеся в результате разложения жирных кислот, превращаются в метан под действием метаногенных бактерий:



В анаэробных условиях, при отсутствии такого окислителя, как кислород, разрушение ароматических веществ происходит более сложно, в многоэтапном процессе, при участии различных ферментов. Одним из наиболее существенных факторов, определяющих скорость ферментативной реакции, является концентрация субстрата

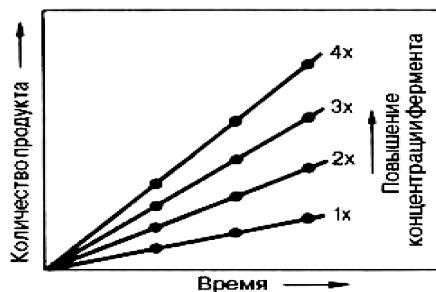
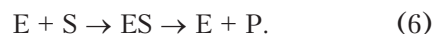


Рис.2. Зависимость скорости реакции от концентрации фермента в присутствии насыщающих концентраций субстрата.

(субстратов) и продукта (продуктов). При постоянной концентрации фермента скорость реакции постепенно увеличивается, достигая определенного максимума, когда дальнейшее увеличение количества субстрата практически не оказывает влияния на скорость ферментативной реакции. В таких случаях принято считать, что субстрат находится в избытке, а фермент полностью насыщен, то есть все молекулы фермента связаны с субстратом.

Ограничивающим фактором в последнем случае становится концентрация фермента. Именно при этих условиях определяют величину максимальной скорости  $V_{max}$  и значения константы Михаэлиса  $K_m$  (рис.2).

Скорость любой ферментативной реакции непосредственно зависит от концентрации фермента. Существующая линейная зависимость между этими величинами, когда скорость реакции прямо пропорциональна количеству присутствующего фермента, справедлива только в определенных условиях, например, в начальный период ферментативной реакции, так как в этот период практически не происходит обратной реакции, а концентрация продукта оказывается недостаточной для обратимости реакции. Именно в этом случае скорость реакции (точнее, начальная скорость реакции  $v$ ) будет пропорциональна концентрации фермента. Фермент является одной из реагирующих молекул в химической реакции и при взаимодействии с субстратом образует промежуточный фермент — субстратный комплекс, который подвергается распаду на продукт и свободный фермент:



Если упростить это уравнение, исключив промежуточный ES-комплекс:



то в уравнениях для скоростей прямой и обратной реакций обязательным компонентом является концентрация фермента:



Однако в уравнениях для константы равновесия ( $K_{eq}$  или  $K_p$ ) концентрация фермента уже не имеет значения:

$$K_p = k_{+1}/k_{-1} = ([E][P])/([E] \cdot [S]) = [P] \cdot [S]. \quad (10)$$

Константа равновесия  $K_p$  ферментативной реакции не зависит от концентрации фермента. Определяя скорость и направление химической реакции, фермент не оказывает влияния на конечные (равновесные) концентрации реагирующих молекул и продуктов, определяющих величину константы равновесия.

Результаты исследований [5–7] позволяют сделать вывод, что технология анаэробной переработки твердого навоза с разбавлением его жидкой фракцией сброженного осадка позволяет повысить выход биогаза на 50–80 % по сравнению с технологией переработки жидкого навоза, снизить затраты энергии на подогрев исходного навоза до температуры брожения в 1,3–2 раза в зависимости от влажности исходного твердого навоза.

Хотя одним из существенных факторов, влияющих на показатели биогазовой установки, являются природно-климатические условия животноводческих ферм, наибольшее влияние на тепловой баланс оказывает содержание сухого органического вещества (СОВ) в сбраживаемой биомассе. Авторами данной работы были проведены соответствующие экспериментальные исследования на биоэнергетической установке ПЖК комбината ОАО «Запорожсталь», описанной в [1, 2, 5]. Усредненные результаты исследований представлены на рис.3.

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы, что при содержании СОВ не более 20 кг/м<sup>3</sup> биогазовые установки имеют сравнительно малый выход биогаза и, следовательно, отрицательный тепловой баланс. Максимальный выход биогаза имеют установки, работающие в мезофильном режиме, в которых

содержание СОВ составляет 80 кг/м<sup>3</sup> в утренние часы. В этом случае расходы энергии на собственные нужды составляют 20–22 %. В осеннее и весеннее время года наиболее выгодный тепловой баланс имеют установки, перерабатывающие навоз с содержанием СОВ более 40 кг/м<sup>3</sup>. В зимний период коэффициент расхода энергии на собственные нужды может превысить 50 % даже при сбраживании навоза с СОВ 80 кг/м<sup>3</sup>.

На основании математических вычислений и обработки полученных экспериментальных данных было выведено экспоненциальное уравнение количества выхода биогаза от содержания СОВ:

$$y = 2,833 e^{0,0283x}. \quad (11)$$

Результаты этих исследований имеют существенную практическую значимость и должны учитываться при разработке, введении в действие и эксплуатации биогазовых установок.

Аналитического метода определения оптимальной продолжительности реагирования навоза пока нет, а имеющиеся рекомендации сводятся к тому, что обработку навоза следует прекратить, когда наступит резкое уменьшение газовыделения. В этом случае имеет место субъективная оценка указанного момента, в результате чего и нет единого мнения о максимальной продолжительности обработки.

Эффективное производство биогаза возможно лишь в случае, когда суммарная энергия полученного биогаза будет значительно превышать расход энергии на его производство, то есть должно выполняться условие получения биогаза, которое в общем виде может быть представлено так:

$$m_{бм} = m_{бг} - q/w, \quad (12)$$

где  $m_{бм}$  — количество товарного биогаза (после учета затрат), м<sup>3</sup>;  $m_{бг}$  — общее количество полученного биогаза, м<sup>3</sup>;  $q$  — расход энергии на собственные нужды установки, кДж;  $w$  — теплотворная способность биогаза, кДж/м<sup>3</sup>.

### Выводы

На основании экспериментальных данных выведено экспоненциальное уравнение количества выхода биогаза от содержания сухого органического вещества.

Показано, что технология анаэробной переработки твердого навоза с разбавлением его жидкой фракцией сброженного осадка позволяет повысить

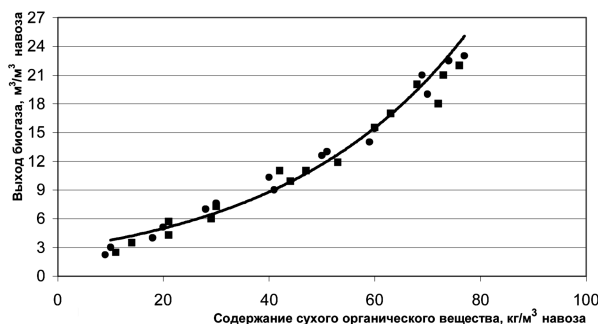


Рис.3. Результаты экспериментальных исследований зависимости выхода биогаза от содержания СОВ в ночные (квадраты) и дневные (круги) часы.



выход биогаза на 55–70 % и снизить затраты энергии на технологический процесс в 1,2–1,7 раза в зависимости от влажности.

#### Список литературы

1. Курис Ю.В., Крючков Е.Н. Анализ энергетического баланса производственно-животноводческого комплекса ЗАО «Запорожсталь» с использованием биоэнергетической установки // Сб. конф. «Биотехнология : Образование, наука». — Киев : НТУ «КПИ», 2003. — С. 141–143.
2. Курис Ю.В., Степанов Д.В., Ткаченко С.И. и др. Увеличение эффективности дальнейшего использования и сжигания биогаза : Достижения и перспективы // Энергетика и электрификация. — 2006. — № 12. — С. 67–79.
3. Баадер В., Доне Е., Брайндерфер М. Биогаз : Теория и практика. — М. : Колос, 1982. — 148 с.
4. Первая в Украине международная конференция «Энергия из биомассы» : Тез. докл. (Киев, 23–26 сент. 2002 г.). — Киев, 2002. — 314 с.
5. Курис Ю.В., Ткаченко С.И. Анализ эффективности мирового энергетического и экологического использования биомассы // Пром. электроэнергетика. — 2008. — № 5. — С. 35–41.
6. Курис Ю.В., Майстренко А.Ю., Нестеренко А.В., Степанов Д.В. Социальные и экономические аспекты в области альтернативной энергетики // Там же. — 2007. — № 4. — С. 45–48.
7. Курис Ю.В., Нестеренко А.В. Методи зниження екологічних викидів нетрадиційних джерел енергії // Матеріали міжвуз. наук. конф. «Сучасні екологічні проблеми — III». — Запоріжжя, 2006. — С. 39–43.

Поступила в редакцию 06.04.10

## The Efficiency of Bio Power Fuel Anaerobic Manufacture Technology

*Kachan Yu.G., Kuris Yu.V., Levitskaja I.N.*

*Zaporozhye State Engineering Academy*

The investigation results in anaerobic fermentation area are submitted. The influence of some factors on methane formation is displayed. Exponential equation of biogas output from dry organic substance content is deduced. It is displayed that anaerobic processing technology for solid manure and dilution with manure liquid fraction of fermented deposit allows to increase biogas output on 55-70 % and decrease technological process energy consumption in 1,2–1,7 times depending on humidity.

**Key words:** biogas, anaerobic fermentation, methane formation.

Received April 6, 2010

Подписывайтесь на журнал  
**«Энерготехнологии и ресурсосбережение»** (индекс 74546)  
 на 2011 г. по Каталогу изданий Украины,  
 Каталогу Агентства «Роспечать»,  
 Сводному Каталогу агентства «УКРИНФОРМНАУКА» для  
 изданий, выпускаемых академиями наук — членами МААН  
**Информацию о журнале**  
**и правилах оформления статей можно найти на сайтах:**

<http://www.ingas.org.ua/index.files/Page765.htm>  
<http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/ETRS/index.html>