



## ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ МЕТОДОМ АНАЭРОБНОЙ ФЕРМЕНТАЦИИ

Умарова М.Б., Мухамедов А.Ю., Эргашев Ж.Р., Махмадиева Х. Р.

ст. гр.М 21- 08 п

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7198718>

### ARTICLE INFO

Received: 25<sup>th</sup> September 2022

Accepted: 27<sup>th</sup> September 2022

Online: 30<sup>th</sup> September 2022

### KEY WORDS

Современные биогазовые установки, биогаз, метантенк, метагенез, анаэробная ферментация.

### ABSTRACT

*Современные биогазовые установки оказались довольно выгодными как с экономической, так и с экологической точки зрения. Биогаз, получаемый с помощью этих установок, является естественным продуктом распада, возникающим в процессе брожения органических веществ, он является регенеративным, а так же безвредным для природы и человека источником энергии. При этом производство биогаза не только не потребляет электроэнергию, оно даёт сырьё для её выработки и избавляет предприятие от необходимости прокладывать газопровод и проводить электричество от общественных сетей. А ещё это и переработка органических отходов, порою токсичных не только в биогаз но и в биоудобрения. Производство биогаза является экологически чистым способом утилизации органических отходов.*

Биогаз – это вещество, аналогичное природному газу по составу и свойствам, получаемое из органических отходов, в любом случае нуждающихся в переработке и утилизации. Современные биогазовые установки оказались довольно выгодными как с экономической, так и с экологической точки зрения. Биогаз, получаемый с помощью этих установок, является естественным продуктом распада, возникающим в процессе брожения органических веществ, он является регенеративным, а так же безвредным для природы и человека источником энергии. При этом производство биогаза не только не

потребляет электроэнергию, оно даёт сырьё для её выработки и избавляет предприятие от необходимости прокладывать газопровод и проводить электричество от общественных сетей. А ещё это и переработка органических отходов, порою токсичных не только в биогаз но и в биоудобрения. Производство биогаза является экологически чистым способом утилизации органических отходов.

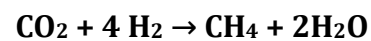
Биогаз образуется в природе только в том случае, если органические соединения разлагаются в анаэробных (без доступа воздуха) условиях, например, в болотах, на берегах водоемов и в пищеварительных трактах



определенных животных. Технология переработки отходов методом анаэробной ферментации известна с древних времен, но только сейчас, используя современные материалы, конструктивные решения, приборы контроля и компьютерное управление, удалось создать новые биогазовые установки, обладающие очень привлекательными технико-экономическими показателями. Для промышленного производства биогаза требуется разработка комплексной технологии, включающей в себя такие компоненты, как накопитель биомассы, метантенк (ферментатор), в котором происходит сбраживание и резервуар для биогаза с системой очистки газа.

**Метанобразующие бактерии.** Все метанобразующие бактерии строгие анаэробы, не образуют спор, трудно выделяемы в чистой культуре. Для создания таксономической структуры метанобразующих бактерий был использован филогенетический подход, основанный на сравнительном анализе нуклеотидных последовательностей 16S рРНК. В соответствии с таким подходом в девятом издании «Определителя бактерий» Берги группа разделена на три порядка (*Methanobacteriales*, *Methanococcales*, *Methanomicrobiales*). Представители *Methanobacterium* - палочки, иногда образующие короткие цепочки; бактерии, относящиеся к роду *Methanococcus*, имеют клетки шаровидной формы, располагающиеся отдельно; шаровидные клетки *Methanosarcina* образуют пакеты кубической формы. Метанобразующие бактерии обитают в почве, илах прудов, озёр, а также в болотах (поднимающиеся на поверхность воды пузыри - "болотный газ" - состоят из метана). В глубинах океанов эти бактерии обычно обитают в местах выхода сульфатов. Метанобразующие бактерии интенсивно размножаются в рубце жвачных животных, где в результате

разложения растительных кормов микрофлорой образуются органические кислоты, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Отличительной особенностью класса *Methanobacteria*, давшей ему название является способность вырабатывать метан. Этот процесс протекает под действием специфических коферментов: метанофурана, тетрагидрометанооптерина (Н<sub>4</sub>МП), коферментов F<sub>420</sub> и F<sub>430</sub>, кофермента М, кофермента В. Чаще всего, процесс метаногенеза можно описать общей формулой:



Но ни водород, ни углекислый газ изначально не находятся в реакторе. Синтез метана из субстрата (в качестве которого может служить твердые и жидкие отходы агропромышленного комплекса, сточные воды, твердые бытовые отходы, отходы лесопромышленного комплекса) протекает в четыре фазы:

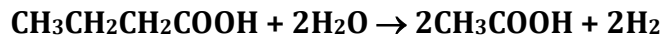
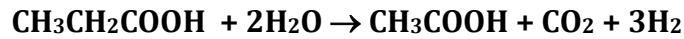
**Гидролизная фаза.** На первом этапе бактерии перестраивают высокомолекулярные органические субстанции (белок, углеводы, жиры, целлюлозу) с помощью энзимов на низкомолекулярные соединения, такие как моносахариды, аминокислоты, жирные кислоты и воду. Энзимы, выделяемые гидролизными бактериями, расщепляют органические составляющие субстрата на малые водорастворимые молекулы. Полимеры превращаются в мономеры.

**Кислотообразующая фаза.** Далее эти соединения разлагаются на другие органические вещества (кислоты: уксусная, пропионовая, масляная, спирты, альдегиды) и соединения: H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, а также N<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S. Этот процесс протекает до тех пор, пока развитие бактерий не замедлится под воздействием образованных кислот, в нем частично принимают участие анаэробные бактерии, употребляющие остатки кислорода и образующие тем



самым необходимыми для метановых бактерий анаэробные условия.

**Ацетогенная фаза.** Эта фаза осуществляется двумя группами



Вторая группа ацетогенных бактерий приводит к образованию

ацетогенных бактерий. Первая образует ацетат с выделением водорода:

уксусной кислоты путем использования водорода для восстановления  $\text{CO}_2$ :

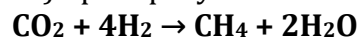


### **Метаногенез.**

Уксусная кислота разлагается на метан, углекислый газ и воду:



Водород и углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) преобразуются в метан и воду:



### **Оптимальные условия для метаногенеза**

Метанобразующие бактерии - строгие анаэробы. Первые исследования чистых культур, выделенных из рубца жвачных животных, показали, что рост их возможен при начальном окислительно-восстановительном потенциале среды ниже -300 мВ. Рост некоторых видов полностью подавляется при содержании в газовой фазе более 0,004% молекулярного кислорода. Однако описаны виды с относительно низкой чувствительностью к  $\text{O}_2$ . В их клетках найдена супероксиддисмутаза. Возможно, в природе такие виды могут сохранять жизнеспособность при кратковременных контактах с  $\text{O}_2$  и возобновлять рост в анаэробных условиях.

Большинство метанобразующих бактерий имеют температурный оптимум для роста в области 30-40 градусов по С, т.е. являются мезофилами, но есть виды, у которых оптимальная зона сдвинута в сторону более низких (25 градусов по С) или высоких (55-65 градусов по С) температур. Выделен экстремально термофильный организм *Methanothermus fervidus*, растущий при

55-97 градусов по С (оптимум 80 градусов по С). Все известные представители этой группы - нейтрофилы с оптимальным рН в области 6,5-7,5. При оптимальной, равной активности кислотообразующих и метановых бактерий поддержание значения рН в желательных пределах не требует дополнительных усилий. Однако иногда кислотообразующие бактерии начинают размножаться быстрее, чем метановые, из-за чего концентрация летучих жирных кислот в бродильной камере возрастает и происходит так называемое «закисление», в результате чего выход биогаза снижается, а кислотность биомассы увеличивается. Среди метаногенов есть галофилы, требующие в качестве одного из оптимальных условий для роста содержания в среде до 65-70 г/л NaCl. Сбраживаемая органическая масса не должна содержать веществ (антибиотики, растворители и т. п.), отрицательно влияющих на жизнедеятельность микроорганизмов. При синтезе метана в искусственных условиях, из-за ограничения свободного пространства, на поверхности органической массы периодически образуется плавающая



корка, мешающая выходу биогаза. Поэтому ее необходимо устранять, перемешивая содержимое биореактора 1-2 раза в сутки. Перемешивание способствует также равномерному распределению температуры и кислотности в биомассе, находящейся в камере сбраживания.

Современные биогазовые установки представляют собой сложный комплекс инженерных сооружений, включающих оборудование для подготовки сырья и переработки его в биогаз, оборудование для дальнейшей очистки биогаза, его хранения и оборудования для производства электроэнергии и тепла. Биогазовое оборудование устроено таким образом, что переработка органических отходов не сопровождается характерными запахами и не выбрасывает в атмосферу токсичных веществ. Оно не потребляет электроэнергию – а, наоборот, производит её (если рассматривать в качестве биогазового оборудования весь комплекс сооружения под названием «биогазовая станция», осуществляющая все этапы процесса, превращающего отходы в тепло и свет). Технология получения биогаза связана с интенсивным разложением органики с помощью специальных коферментов и условий. Жидкие и твердые отходы поступают в биореактор (метатанк), там они сбраживаются и перемешиваются таким образом, что на выходе получается биоудобрение и биогаз. Далее биогаз поступает в газгольдеры, очищается и хранится, а для дальнейшего использования газ поступает в когенерационный блок на базе биогазогенератора, вырабатывающий электроэнергию и тепло. Конструктивно, биогазогенераторы - это корпус, разделенный на камеры перегородками, в которых содержатся и взаимодействуют различные газовые смеси. Таким образом, органические отходы предприятия не выбрасываются и не загрязняют окружающую среду, а используются в

дальнейшем на благо предприятия уже в новом своём качестве.

Установки для производства биогаза из органических отходов обычно подразделяют на четыре основных типа:

1. без подвода тепла и без перемешивания сбраживаемой биомассы;
2. без подвода тепла, но с перемешиванием сбраживаемой биомассы;
3. с подводом тепла и с перемешиванием биомассы;
4. с подводом тепла, с перемешиванием биомассы и со средствами контроля и управления процессом сбраживания.

**Биореактор** - это основа любой биогазовой установки, и к его конструкции предъявляются достаточно жесткие требования. Так, корпус биореактора должен быть достаточно прочен при абсолютной герметичности его стенок. Обязательны хорошая теплоизоляция стенок и их способность надежно противостоять коррозии. При этом необходимо предусмотреть возможность загрузки и опорожнения реактора, а также доступ к его внутреннему пространству для обслуживания. Формы реакторов весьма разнообразны. Так, с точки зрения создания наиболее благоприятных условий для перемешивания жидкого субстрата, накапливания газа, отвода осадков и разрушения образующейся корки представляется целесообразным использование резервуара, формой напоминающего яйцо. Крупные реакторы такой формы обычно сооружают из бетона. Существуют цилиндрические резервуары, с конусными верхней и нижней частями, с характерным небольшим пространством для накопления газа и ограниченным объемом для плавающей корки, а также с хорошим отводом шлака. Однако в подобных реакторах создаются менее благоприятные условия для перемещения жидкого субстрата. Резервуары большого объема



такой формы, используемые в коммунальных установках для очистки и разложения стоков, как и реакторы в форме яйца, изготавливают из бетона. Однако «цилиндрические» реакторы несколько дешевле. В индивидуальных хозяйствах, обычно используют реакторы цилиндрической формы, небольшой вместимости, делают из стали или из стеклопластика.

**Цилиндрические резервуары** относительно просты в изготовлении, что объясняется обширным опытом строительства емкостей для сельскохозяйственных целей (стальные, бетонные, стеклопластиковые цистерны-бункера для силоса и других кормов). Однако по сравнению с резервуарами предыдущих форм в цилиндрическом резервуаре невозможно организовать достаточно хорошие условия для перемещения субстрата, при этом здесь приходится считаться с более высокими затратами на удаление осадка и разрушение плавающей корки, что связано с увеличением расхода энергии на перемешивание массы. Если **резервуар цилиндрической формы** разделен поперечной вертикальной перегородкой на две камеры, то возможно организовать систему получения биогаза с поочередным использованием камер резервуара. В результате этого затраты на строительство резервуара с перегородкой обойдутся дешевле, чем сооружение двух отдельных резервуаров. При такой компоновке уменьшается значение теплоизоляции наружных стенок резервуара, а в перегородку, выполняемую из достаточно теплопроводного материала, не очень сложно встроить какое-либо нагревательное устройство, что придаст установке дополнительные конструктивные и энергетические выгоды.

**Устройства для перемешивания субстрата.** При постоянном перемешивании субстрата осуществляется равномерное распределение в жидкости находящихся в ней твердых веществ, различающихся по размеру, форме и плотности, что служит предпосылкой беспрепятственного и эффективного протекания процесса брожения.

**Механические мешалки.** Достаточно эффективны в небольших реакторах при переработке тяжелых субстратов. Однако если используются субстраты с малой вязкостью, да к тому же содержащие мало веществ, склонные к осаждению или образованию плавающей корки, то механические перемешивающие устройства применяют и в относительно крупных реакторах. Механические мешалки наиболее практичны для простых небольших биогазовых установок, используемых в индивидуальных хозяйствах.

**Гидравлические перемешивающие системы.** Содержимое крупных реакторов, особенно цилиндрической формы, часто перемешивают гидравлическим способом, то есть с помощью потоков (струй) жидкости, поступающей в реактор.

**Перемешивание с помощью газа.** Хорошее качество перемешивания получают, нагнетая образующийся в результате брожения газ в жидкий субстрат. Однако при этом субстрат не должен быть слишком вязким и склонным к образованию плавающей корки. Если этими качествами субстрат не обладает, при использовании газа придется непрерывно удалять из субстрата всплывающие частицы или отделять крупные твердые частицы от субстрата перед поступлением его в реактор.

**Газгольдеры.** Для нормального функционирования газовых



нагревательных приборов в хозяйстве объем газа, вырабатываемого биогазовой установкой, в идеале должен соответствовать объему газа, расходуемого потребителем в каждый данный момент. Но очевидно, что на практике такого соответствия добиться невозможно и обычно объем газа используемого либо больше, либо меньше объема газа производимого. Поэтому, чтобы рационально применять биогаз в хозяйстве, необходимо предусмотреть аккумулялирование («собираение») газа в специальной емкости, называемой **газгольдером**.

Аккумулялирование газа необходимо для выравнивания колебаний (пиков) потребления газа, различий в его качестве, а также отклонений фактической производительности газовых установок от расчетной по каким-либо причинам.

**Мокрый газгольдер низкого давления колокольного типа.** В газгольдерах подобного типа газ скапливается под колоколом (колпаком), края которого погружены в жидкость, образуя гидравлический затвор. Давление газа под колоколом определяется весом жидкости, вытесненной из-под колокола газом или весом самого колокола, если последний плавает в жидкости, и в таких газгольдерах не превышает 5 кПа.

В настоящее время практически все эксплуатируемые в Восточной Азии простейшие биогазовые установки оснащены такими мокрыми газгольдерами с колпаками, которые обычно располагаются (плавают) непосредственно в бродильной камере в самом жидком навозе. Небольшие потери газа по периферии колокола не играют роли. Недостаток этих газгольдеров в наших условиях - опасность замораживания субстрата зимой, что вызывает необходимость в

отоплении резервуара биогазовой установки.

**Сухой газгольдер низкого давления.** Для создания в таком газгольдере постоянного давления в корпусе последнего предусмотрена уплотняющая манжета, на которую постоянно давит груз, подвешенный через блоки на тросиках. Так что, когда количество газа в резервуаре уменьшается, и давление в нем падает, груз опускается, поддерживая нужное давление. В сухом газгольдере рабочее давление обычно составляет 2-5 кПа. Кстати, в отличие от мокрого (водяного) газгольдера сухому газгольдеру массивный фундамент не требуется, а основание газгольдера легко герметизировать с помощью какой-либо синтетической пленки, поэтому в среднем сооружение такого газгольдера обходится примерно на 20% дешевле, чем мокрого.

**Оболочковый газгольдер низкого давления.** В качестве емкости для газа здесь служит герметическая оболочка (подушка). Груз, подвешенный через блоки на тросиках, постоянно давит на подушку, создавая в ней соответствующее давление газа. Отметим, что такая конструкция газгольдера требует устройства фундаментной плиты достаточной прочности. Для защиты от повреждений газгольдер помещают в специальный кожух.

Оболочковые газгольдеры широко применяются в установках для очистки городских стоков. Стоимость используемых в настоящее время газгольдеров номинальной вместимостью до 200 м<sup>3</sup> (такие газгольдеры чаще всего применяются в принадлежащих фермерским хозяйствам биогазовых установках) исключительно высока и составляет 20...30% стоимости всей установки. Поэтому, исходя из экономических соображений, газгольдер выгодно



использовать только для выравнивания суточных пиков в потреблении газа, то есть не следует строить газгольдер больших размеров, а лучше попытаться обеспечить, например, с помощью рационального подбора газопотребляющей аппаратуры возможно более равномерное (без пиков) потребление газа. Для интенсификации процесса сбраживания и оптимизации конструктивных и энергетических параметров метантенка предлагается совместить перемешивающее устройство (мешалка) и нагревательный элемент в один узел, т.е. перемешивающее устройство одновременно является нагревательным элементом. Такое совмещение позволяет нагревать и поддерживать заданный температурный режим более равномерно за счет вращения теплообменника и передаче тепла биомассе (субстрату) по всему объему метантенка, так как однородность температуры в движущейся среде непосредственно связана с явлениями, происходящими в тепловом пограничном слое, в отличие от всех

существующих теплообменников (водяная рубашка, трубчатые неподвижные), которые позволяют нагревать только ограниченные зоны, что приводит к неравномерному нагреву.

Необходимо также отметить преимущества биоустановок: они удовлетворяют потребность хозяйства в энергоносителях; способствуют охране окружающей среды, так как в процессе анаэробной переработки отходов получается экологически чистое органическое удобрение; разрушается клетчатка, значительное количество белкового азота переходит в аммиачный, доступный растениям; ускоряется процесс разложения помёта, по сравнению с обычным перегреванием в буртах, при этом гибнут семена сорных растений, гельминты, снижается порог запаха. Применение сброженной массы позволяет повысить урожайность полевых культур. Если эффективность процесса разделить на энергетическую (от использования биогаза) и экологическую (охрана окружающей среды), то соотношение составляет 22 % на 78 %.



Лабораторная испытание мы провели в метантенке периодическое перемешивание субстрата, которое обеспечивала эффективную и стабильную работу БГУ. Перемешивания - высвобождение образованного биогаза, перемешивание

свежего субстрата и бактерий (прививка), предотвращение образования корки и осадка, недопущение образования участков разной температуры внутри метантенка, обеспечение равномерного распределения популяции бактерий,



предотвращение формирования пустот и скоплений, уменьшающих эффективную площадь метантенка. При выборе метода перемешивания мы учитывали, что процесс сбраживания представляет собой процесс жизнедеятельности симбиоза различных штаммов бактерий и при разрушении этого сообщества. Процесс ферментации будет непродуктивным до образования нового сообщества бактерий. Поэтому слишком частое или продолжительное перемешивание вредно. Рекомендуется медленное перемешивание субстрата через каждые 4 – 6 ч. Оптимальное перемешивание сырья повышал выход биогаза до 50-70%.

БГУ обеспечивают утилизацию (переработку) органических отходов 3 и 4 класса опасности согласно Постановлению от 12 июля 2015 г. №15, в следующих режимах:

- в психрофильном режиме оптимальная температура в метантенке 15 – 20 °С, но может быть и ниже. В таком режиме отходы перерабатываются 30 – 40 дней. Психрофильный режим обычно используется в летнее время года в случае, когда тепло и количество субстрата (отходов) значительно меньше обычного, например, из-за выпаса скота;
- в мезофильном режиме при температуре 30 – 40 °С органические

отходы перерабатываются 7 – 15 дней, в зависимости от вида отходов;

- в термофильном режиме при температуре 52 – 56 °С органические отходы перерабатываются за 5 – 10 дней, при этом качество газа и удобрений, по ряду показателей, обычно ниже, чем в мезофильном режиме. Кроме того в термофильном режиме традиционно потребляется больше энергии для обогрева. Такой режим подходит большего всего тем, у кого основная задача — переработать большое количество отходов. При оптимизации работы установки и состава отходов, можно ускорить переработку даже до 3 – 4 дней. *Выгода от работы в термофильном режиме в том, что резко снижается стоимость 1 кВт установленной мощности БГУ.*

Требования к допустимым пределам колебания температуры субстрата, для оптимального газообразования, тем жестче, чем выше температура процесса ферментации: при психрофильном температурном режиме –  $\pm 2$  °С в час; мезофильном –  $\pm 1$  °С в час; термофильный –  $\pm 0,5$  °С в час. Для определения эффективности внедрения данной установки была проведена ее оценка энергетическим методом.

## References:

1. Умарова М.Б., Зохиджонов С.А., Имамалиева М. А. Биоёқилғилар олиш технологияси ва улардан фойдаланиш истиқболлари. Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы экологии и охраны окружающей среды и биотехнологии». 4 секция. Экобиотехнологические образовательные технологии. Ташкент 2022. стр.1004
2. Умарова М.Б. Шапатов Ф.У., Мухамедов А. Ю. Получение биогаза от биомассы на установке метантенк Ist-International Congress on Modern Sciences Tashkent Chemical-Technological Institute May 10-11, 20221654