

ТЕХНОЛОГИИ, СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Научная статья

УДК 664.769

doi: 10.55170/19973225_2023_8_4_46

**УВЕЛИЧЕНИЕ ВЫХОДА МЕТАНА ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ СЫРЬЯ
С ПОМОЩЬЮ ЭКСТРУЗИИ**

Дмитрий Иванович Фролов¹, Анатолий Алексеевич Курочкин²✉, Максим Александрович Потапов³

^{1, 2, 3}Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹surr@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9166-1132>

²anatolii_kuro@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-3824-4364>

³makcpotapov@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0002-8632-8447>

Цель исследований – изучить влияние предварительной экструзионной обработки на изменение выхода биогаза из различных типов биомассы птичьего помета. В статье рассмотрено применение экструдера для увеличения выхода метана при производстве биогаза. Экструзия проводилась для улучшения анаэробного сбраживания различных типов птичьего помета. Экструдер протестирован на трех видах сельскохозяйственной биомассы, представленных тремя образцами птичьего помета с подстилкой и без нее. Для эксперимента использовали одношнековый экструдер ЭК-40. Экструдер оснащен рабочим шнеком диаметром 40 мм, отношение длины шнека к его диаметру – 4:1, температурный режим 140/170°C поддерживали за счет фиксированной частоты вращения шнека. С помощью дисперсионного анализа было оценено общее относительное увеличение выхода метана в образцах биомассы после экструзии. Полученный избыток энергии от использования экструдера был рассчитан для определения типов биомассы, получающих наибольшую выгоду от экструзии. Проведено сравнение электрического энергетического эквивалента выхода метана из неэкструдированного и экструдированного материала без затрат электрической энергии на экструдер. Образцы проанализированы на повышение температуры, максимальный размер частиц, потенциал выделения биогаза, выделение и потребление энергии. Обработка экструдером повысила температуру биомассы на 6-34°C. Крупные частицы (больше 1 мм) больше всего подвергались воздействию экструдера. Экструзия ускорила разложение медленно разлагаемых органических соединений, способствовала разложению некоторых не разлагаемых в обычных условиях органических соединений. Выход метана увеличился на 14-70% через 28 дней обработки и на 9-10% через 90 дней обработки. Эквивалент полученной электрической энергии из метана без энергии, использованной экструдером, дал выход энергии в размере 13-69% и 6-10% через 28 и 90 дней, соответственно.

Ключевые слова: экструзия, вакуум, биогаз, метан, сушка, обработка.

Для цитирования: Фролов Д. И., Курочкин А. А., Потапов М. А. Увеличение выхода метана при предварительной обработке сырья с помощью экструзии // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. №4. С. 46–57. doi: 10.55170/19973225_2023_8_4_46

TECHNOLOGY, MEANS OF MECHANIZATION AND POWER EQUIPMENT
IN AGRICULTURE

Original article

INCREASE IN METHANE YIELD FROM EXTRUSION FEED PRETREATMENT

Dmitry I. Frolov¹, Anatoly A. Kurochkin²✉, Maxim A. Potapov³

^{1, 2, 3}Penza State Technological University, Penza, Russia

¹surr@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9166-1132>

²anatolii_kuro@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-3824-4364>

³makcpotapov@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0002-8632-8447>

The aim of the research is to study the effect of pre-extrusion treatment in changing the biogas output from various types of biomass of bird droppings. The article deals with the application of extruder to increase methane yield in biogas production. Extrusion was carried out to improve anaerobic digestion of different types of poultry litter. The extruder was tested on three types of agricultural biomass represented by 3 samples of poultry droppings with and without bedding. A single-screw extruder EK-40 was used for the experiment. The extruder was equipped with a 40 mm diameter working screw, the ratio of screw length to the screw diameter was 4:1, and the temperature regime of 140/170 °C was maintained by fixed screw speed. The overall relative increase in methane yield in biomass samples after extrusion was evaluated using analysis of variance. The resulting energy surplus from extruder use was calculated to determine which biomass types benefit most from extrusion. The electrical energy equivalent of methane yield from non-extruded and extruded material was compared after deducting the electrical energy input to the extruder. Samples were analyzed for temperature increase, maximum particle size, biogas release potential, energy release and energy consumption. The extruder treatment increased the biomass temperature by 6-34°C. Large particles (larger than 1 mm) were most affected by extruder treatment. Extrusion accelerated the decomposition of slowly degradable organic compounds and also promoted the decomposition of some organic compounds not degradable under normal conditions. Methane yields increased significantly, by 14-70% after 28 days of treatment and by 9-10% after 90 days of treatment. The equivalent of the electrical energy obtained from the methane minus the energy used by the extruder gave energy yields of 13-69% and 6-10% after 28 and 90 days, respectively.

Keywords: extrusion, vacuum, biogas, methane, drying, processing.

For citation: Frolov, D. I., Kurochkin, A. A. & Potapov, M. A. (2023). Increase in methane yield from extrusion feed pretreatment. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara State Agricultural Academy)*, 4, 46–57 (in Russ.). doi: 10.55170/19973225_2023_8_4_46

Переизбыток органических удобрений вызывает острую необходимость в альтернативной переработке навоза в полезную энергию. Экологически чистая электроэнергия производится из птичьего помета – возобновляемого топлива, которое является относительно сухим и имеет теплотворную способность в среднем 2,4 кВт·ч/кг. Производство электроэнергии из птичьего помета позволяет сократить выбросы в атмосферу и осуществить экономию от сжигания ископаемого топлива [25].

Одним из наиболее развитых способов преобразования отходов птицефабрик является анаэробное сбраживание навоза животных и побочных продуктов сельского хозяйства. Данным способом возможно осуществлять производство метана, который можно использовать в качестве топлива для энергетических целей. Он считается возобновляемым источником энергии, поскольку снижает воздействие на окружающую среду, включая выбросы CO₂. Этот возобновляемый источник энергии является частью решения проблемы растущего во всем мире спроса на непрерывную, независимую энергию, не получаемую из ископаемого топлива. Основным источником производства биогаза являются побочные продукты сельского хозяйства, такие как навоз и подстилка, остатки урожая и энергетические культуры [24].

В настоящее время остаточное содержание биогаза в анаэробно переработанной биомассе остается достаточно значимой величиной. Следовательно, выход метана из объема биомассы может быть дополнительно улучшен. Проблема в том, что органические соединения биомассы не полностью разлагаются в ходе процесса. Предварительная обработка может улучшить доступ к лигноцеллюлозным частям биомассы (целлюлозе, гемицеллюлозе и лигнину), которые иначе трудно или невозможно разложить. Предварительная обработка действует посредством солиubilизации гемицеллюлозы или лигнина, декристаллизации целлюлозы и структурного изменения лигнина. Это, среди прочего, позволяет увеличить удельную площадь обрабатываемого сырья. Результатом является увеличение доступа бактерий и ферментов и, таким образом, улучшает гидролиз. Такая обработка приводит либо к увеличению конечного выхода метана, либо к изначально более быстрому процессу получения биогаза [7].

В одном из исследований разьединение растительных и животных клеток в тканях биомассы с целью получения частиц размером менее 0,35 мм увеличило выход биогаза на 15-20% [1]. Показано, что термическая обработка осадка сточных вод увеличивает выход биогаза на 50 и 80% после нагрева до 70 и 170°C соответственно [2]. Отмечено, что щелочная обработка осадка сточных вод увеличивает скорость производства биогаза и приводит к увеличению начальной скорости на

150% [3]. Окисление озона сточных вод привело к первоначальному увеличению выхода биогаза на 200% [4], в то время как мокрое окисление привело к увеличению выхода метана на 35%. При этом ультразвуковая и микроволновая обработка осадка сточных вод увеличивает производство газа на 20-50% [5].

Необходимо дополнительное увеличение энергетических и материальных затрат, чтобы предварительная обработка была наиболее эффективной. Серьезными негативными факторами для экономической составляющей являются добавление химикатов и процедуры, требующие большого количества энергии. Например, несмотря на низкое энергопотребление, мацерация не имеет положительного энергетического баланса [6].

Экструзия – это процесс, объединяющий несколько операций в одном блоке. Сырье, такое как птичий помет с добавками, подается в один конец экструдера и затем транспортируется по длине цилиндра с помощью подающего шнека. По мере движения материала по стволу он подвергается теплу трения, перемешиванию и сдвигу. В центре цилиндра находится зона сжатия, а в конце цилиндра – зона расширения. Это приводит к значительному расширению и модификации материала в месте сброса давления, что обеспечивает разрушение структурных элементов перерабатываемого сырья.

Экструзия вызывает деполимеризацию целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина и белка [7]. Кроме того, в зависимости от интенсивности экструзионного процесса возможна термическая деградация сахаров и аминокислот. В ряде исследований показано, что экструзия повышает пищевую ценность кормов для животных [8, 9]. В результате экструзии также наблюдается увеличение производства этанола [10]. Поэтому можно ожидать, что экструзионная обработка приведет к увеличению выхода биогаза из биомассы из-за увеличения доступа бактерий и ферментов к ингредиентам сырья. В пользу этой гипотезы свидетельствуют данные других исследователей: после 30-дневного сбраживания травы и кукурузы наблюдалось увеличение общего выхода метана на 8-27% [11, 12].

Цель исследований – изучить влияние предварительной экструзионной обработки на изменение выхода биогаза из различных типов биомассы птичьего помета.

Задачи исследований – определить и сравнить выход метана, а также эквивалентный выход электроэнергии при анаэробном сбраживании биомассы с использованием предварительной обработки экструдером сырья и без нее.

Материал и методы исследований. Твердые фракции помета получали путем предварительного разделения помета на твердую и жидкую фракции с помощью фильтрации. В результате получается твердая фракция, содержащая более мелкие частицы помета, чем после обработки на шнековом прессе. Характеристика используемых типов биомассы представлена в таблице 1.

Для эксперимента использовали одношнековый экструдер ЭК-40. Экструдер оснащен рабочим шнеком диаметром 40 мм. Отношение длины шнека к его диаметру – 4:1, температурный режим 140/170 °С поддерживали за счет фиксированной частоты вращения шнека.

На выходе экструдера специальная пластина позволяла регулировать размер выходного отверстия в интервале от 5 до 12 см².

Эксперимент проводился путем подачи в экструдер 10 л биомассы. Общий объем в количестве 1 л был собран путем многократного отбора обработанного продукта из последней трети биомассы и смешивания проб.

Таблица 1

Характеристика различных типов собранной биомассы

Номер образца	Тип биомассы	Консистенция (фазовое состояние)	Массовая доля влаги, г/кг	Массовая доля органического вещества, г/кг	Массовая доля золы, г/кг
1	Помет птичий с подстилкой	сыпучее	400	450	150
2	Помет птичий от молодняка	вязко-сыпучее	550	350	100
3	Помет птичий от взрослой птицы	вязкое	750	180	70

Экструдер очищали для удаления остатков тестируемой биомассы между обработками. Для очистки в экструдер подавалось 30 л грубого материала, т.е. травы, кукурузной соломы и глубокой подстилки. После этого добавляли 10 л индикаторного материала (кукуруза). Завершающим этапом очистки было добавление следующей тестируемой биомассы в количестве, достаточном для того, чтобы на выходе не было индикаторного материала, что составляло 20 л. Таким образом, всего в эксперименте было задействовано около 30 л каждой тестируемой биомассы.

Обработанные образцы собирали у выходного отверстия экструдера. Необработанные и обработанные образцы помещали в пластиковые (полиэтиленовые) контейнеры и хранили до проведения анализа.

Температуру образцов биомассы измеряли до и сразу после экструзии после переноса образцов в пластиковые контейнеры.

Потребление электроэнергии оценивали путем мониторинга электрического тока во время экспериментов по экструзии.

Биогазовый потенциал собранных образцов биомассы оценивался в ходе периодических испытаний. Это показатель производства биогаза в смеси биомассы и инокулята. Биомасса и инокулят добавлялись в соотношении 2,5:1 по отношению к массе летучих твердых веществ. Общий объем биомассы и инокулята составлял 450 г.

Объем биогаза и концентрацию метана в биогазе измеряли десять раз на регулярной основе во время инкубации. Также определяли биогазообразование инокулята (контроль). Производство метана в образцах биомассы было скорректировано с учетом производства только инокулята.

В образцах объемом 1 л идентифицировали частицы по размеру и измеряли их длину в диапазоне от 0,5 до 20 мм.

Проводили сравнение выхода метана необработанной и обработанной биомассы. Для проверки выборок равенства средних значений и их сравнения использовали t-критерий Стьюдента. Был рассчитан коэффициент дисперсии. С помощью дисперсионного анализа общее относительное увеличение выхода метана в образцах биомассы было проверено на значительное увеличение после экструзии.

Для проверки статистической взаимосвязи нескольких факторов были проведены сравнения с помощью критерия Пирсона. Выявлялись следующие взаимосвязи: повышение температуры, вызванное экструзией, с содержанием сухого вещества входной биомассы и увеличением выхода метана; повышение температуры с увеличением выхода метана и энергозатратами экструдера.

Для определения энергетического баланса определяли электрические эквиваленты выходов метана (согласно теплотворности видов топлива для 1 м³ метана – 13,8 кВт), из электрического эквивалента экструдированных образцов вычитали энергопотребление экструдера. Содержание электрической энергии в метане в результате испытаний биогаза рассчитывали по уравнению:

$$E_b \left(\frac{\text{неэкструдированная}}{\text{экструдированная}} \right) = \frac{Q_n \cdot n \cdot V_{CH_4}}{M_b}, \quad (1)$$

где Q_n – низшая теплота сгорания, МДж/м³ (для метана 36 МДж/м³);

n – эффективность преобразования метана в электроэнергию в газомоторно-генераторной установке, % (установлена в 40%);

V_{CH_4} – объем метана в стандартных условиях на массу биомассы, л/кг;

M_b – вес биомассы, кг.

Потребление электроэнергии экструдером рассчитывалось по следующему уравнению:

$$E_{ext} = \frac{I \cdot U \cdot \cos Q \sqrt{3}}{C}, \quad (2)$$

где $U = 360$ В;

$\cos Q = 0,82$;

C – производительность, т/ч;

I – электрический ток, А (от 10 до 25 А).

Энергетический баланс электроэнергии для процесса экструзии рассчитывался как количество электроэнергии, которое можно было произвести путем преобразования дополнительно произведенного метана в электроэнергию, без электроэнергии, потребленной в ходе процесса экструзии.

С помощью дисперсионного анализа проведена корреляция общего увеличения выхода энергии в образцах биомассы с увеличением, вызванным экструзией. Полученный избыток энергии от использования экструдера был рассчитан для определения типов биомассы, получающих наибольшую выгоду от экструзии.

Результаты исследований. В ходе исследования было экструдировано 3 различных образца биомассы и измерено производство метана в течение 28-дневного и 90-дневного периодического анаэробного сбраживания.

В целом, экструзия вызывала увеличение продукции метана из всех типов тестируемой биомассы (рис. 1, 2). Таким образом был улучшен доступ бактерий и ферментов к биоразлагаемым соединениям. Это указывает на потенциал использования экструдера для предварительной обработки биомассы перед использованием в биогазовом реакторе.

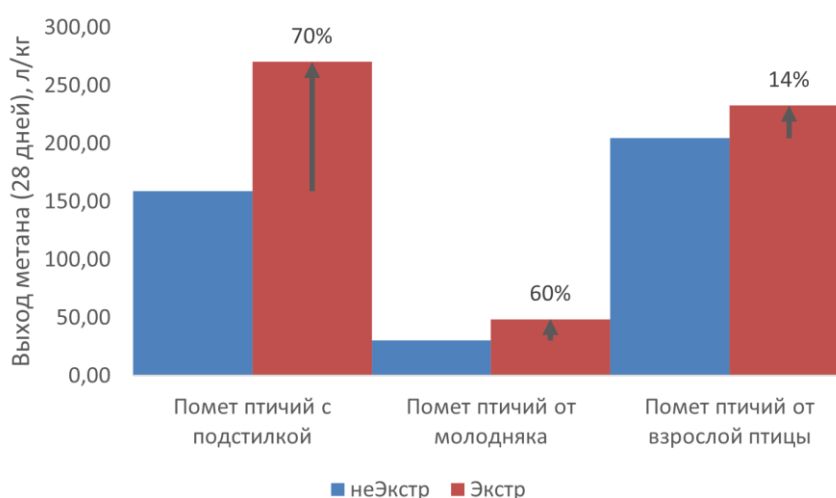


Рис. 1. Влияние экструзии на увеличение выхода метана (CH₄) через 28 суток в зависимости от типа биомассы (процентное значение над каждым столбцом – увеличение за счет экструзии по отношению к необработанной биомассе)

Фактический прирост выхода метана через 90 дней был ниже, чем через 28 дней для всех типов биомассы (рис. 1, 2). Это связано с увеличением доступа к соединениям, которые разлагаются в процессе анаэробного сбраживания (обычно они разлагаются на более поздней стадии этого процесса). Фактическое увеличение выхода метана было существенно заметнее при использовании экструзии. Это связано с доступом к соединениям, которые обычно не разлагаются в процессе анаэробного сбраживания. Влияние экструзии на совокупное производство метана было заметным через 28 дней (70%), однако через 90 дней оно становилось статистически незначительным (рис. 2). Далее разница сократилась до 10%, и наблюдалась тенденция к дальнейшему снижению. Следовательно, структурное разрушение, вызванное экструдером, должно привести к тому, что медленно разлагаемые соединения стали бы легче разлагаться. Напротив, было обнаружено, что экструдер практически не расщепляет соединения в соломенной подстилке, которые обычно не разлагаются в процессе анаэробного сбраживания.

Экструдирование образцов помета птичьего от молодняка вызывало картину выхода метана, аналогичную таковой для помета с подстилкой: большой эффект через 28 дней и его снижение через 90 дней (рис. 1, 2). Образцы помета птичьего от молодняка были собраны на поздней стадии и имели высокое содержание лигнина. Хотя содержание сухого вещества было ниже, чем в помете с подстилкой, как изначально, так и в конечном итоге, одинаковый эффект, должно быть, вызван сходством химического состава двух типов биомассы.

Экструзия твердой фракции помета вызывала большее увеличение выхода метана, при получении твердой фракции из навоза, прессованного шнековым способом. Через 28 дней все три фракции помета показали статистически значимое увеличение выхода метана. Через 90 дней все твердые образцы, полученные шнековым прессованием, показали статистически значимое увеличение.

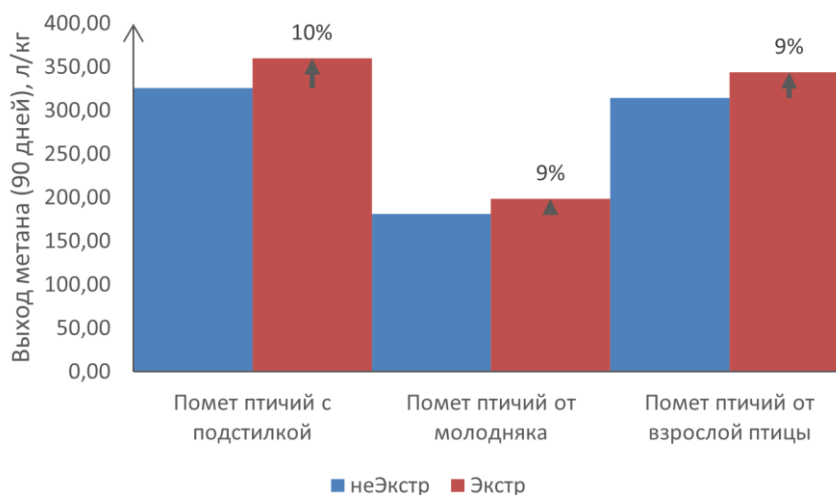


Рис. 2. Влияние экструзии на увеличение выхода метана (CH₄) через 90 дней в зависимости от типа биомассы (процентное значение над каждым столбцом – увеличение за счет экструзии по отношению к необработанной биомассе)

Экструзия помета с подстилкой привела к увеличению выхода метана на 70% через 28 дней (рис. 1). Через 90 дней наблюдалось увеличение только на 10% (рис. 2). В течение 90 дней в трех образцах помета наблюдалось статистически значимое увеличение выхода метана. Возможно, это вызвано дополнительным выделением метана из соломенной части подстилки. В отличие от обычной соломы, солома в подстилке была пропитана жидкой фракцией помета.

Вариации увеличения выхода метана велики в зависимости от типа биомассы после 90 дней анаэробного сбраживания. Причина – большие физические и химические различия между системами, используемыми на разных фермах. Большой разброс не является неожиданным, поскольку выход метана из неэкструдированной неоднородной биомассы, такой как сырой помет и подстилка, обычно значительно варьируется. Действительно, образцы были собраны для того, чтобы представить широкий спектр сельскохозяйственной биомассы, а не для точной оценки одного типа биомассы. Таким образом, фактический эффект экструзии как метода предварительной обработки зависит от характеристик используемой индивидуальной биомассы.

В среднем выход метана через 28 и 90 дней увеличился на 47 и 10 л метана, соответственно, на 1 кг органического материала в биомассе (рис. 1, 2). Оба наблюдаемых увеличения выхода метана были статистически значимыми.

Применяемые методы доказали свою эффективность в качестве предварительной обработки анаэробного сбраживания. Условия, при которых происходило анаэробное сбраживание, и период времени эксперимента указаны не во всех анализируемых в обзоре исследованиях; поэтому трудно проводить сравнения. Другими методами предварительной обработки, которые в некоторых случаях показали эффект, аналогичный экструзии, на производство метана, являются мацерация, микроволновая обработка, ультразвуковая обработка и мокрое окисление [13, 14, 15, 16]. Термическая обработка, окисление озоном и щелочная обработка в некоторых случаях показали даже большее увеличение выхода метана [5, 17, 18].

В целом, экструзия имеет потенциал в качестве метода предварительной обработки перед анаэробным сбраживанием на биогазовой установке.

В общем, экструдер может вызвать смешивание биомассы, нагрев, давление и сильный

сдвиг при сбросе давления. Для оценки механизмов влияния увеличения выхода биогаза экструдированной биомассы изучены повышение температуры внутри экструдера, уменьшение размера частиц и содержания трудно разлагаемых полимерных структурных соединений.

Нагрев биомассы в данном исследовании можно объяснить только трением. Фактическое повышение температуры зависит от свойств биомассы: повышение температуры помета птичьего с подстилкой, помета птичьего от молодняка и помета птичьего от взрослой птицы составило 34, 35, и 12 °С, соответственно. Фактическое повышение температуры достоверно коррелирует с содержанием сухого вещества биомассы. Чем больше содержание сухого вещества, тем больше трение экструдера и тем выше температура биомассы на выходе. Действительно, энергия, прикладываемая экструдером, коррелирует с повышением температуры. То есть, чем выше содержание сухого вещества, тем ниже теплоемкость биомассы, тем меньше энергии требуется для производства нагрева и тем выше повышение температуры биомассы.

Подведение тепла к биомассе ранее приводило к увеличению выхода метана [19]. Однако наблюдаемое повышение температуры не коррелирует с увеличением выхода метана. Также нет никакой корреляции между повышением температуры и выходом метана в пределах одного и того же типа биомассы. Следовательно, повышение температуры не является основным эффектом экструдера. Вместо этого повышение температуры указывает на величину трения, оказываемого шнеком экструдера на материал с определенным содержанием сухого вещества, что, очевидно, не имеет тесной связи с фактической химической структурной деградацией биомассы.

Было замечено, что экструзия вызывает изменение размера частиц травы и кукурузы [20]. В других исследованиях было показано, что деградация размера частиц включает деполимеризацию целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина и белка [21].

Самые крупные частицы, оставшиеся в образцах после экструзии, имели длину 0,5-2 см, а самые крупные частицы в не экструдированном материале – 1-20 см. Чем больше начальный размер частиц, тем больше наблюдаемое уменьшение размера частиц. Частицы размером более примерно 1 мм уменьшались в размерах на 50-95%. Напротив, частицы размером менее 1 мм не уменьшались в размерах. Это подтверждает тот факт, о котором свидетельствует увеличение выхода метана из шнеково-прессованных и флокулированных твердых фракций, что экструзия эффективна только для крупных частиц. Кроме того, это указывает на то, что экструдер увеличивает удельную поверхность биомассы и тем самым увеличивает доступ бактерий и ферментов и, таким образом, усиливает гидролиз.

При экструзии биомассы в данном исследовании не наблюдалось существенного снижения содержания целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. При этом корреляция между составом сырой биомассы и увеличением выхода метана практически отсутствовала. В аналогичном исследовании наблюдалось снижение общего содержания целлюлозы и лигнина на 21% [22]. Однако, в отличие от настоящего исследования, процесс экструзии включал нагрев до 90°C, добавление воды и CO₂. Следовательно, более энергичная экструзия приводит к усилению деполимеризации и, как и ожидалось, увеличению выхода метана.

Эффективность экструдера при измельчении биомассы можно повысить еще больше, чем в представленном исследовании. Давление внутри зоны сжатия экструдера можно увеличить за счет уменьшения размера торцевого отверстия. Кроме того, внешний нагрев также может повысить эффективность экструдера для увеличения выхода метана.

В целом механизм применяемого экструдера не основан на нагреве биомассы. Также не было доказано, что деградация химических структур является основным механизмом экструдера, который приводит к улучшению деградации биомассы во время процесса анаэробного сбраживания.

Чтобы экструдер был экономически эффективным, увеличение производства энергии в виде электроэнергии из-за увеличения выхода метана должно превышать входную энергию, используемую экструдером.

Потребление электроэнергии экструдером существенно коррелирует с содержанием сухого вещества биомассы. Однако корреляции между энергетическим вкладом в экструдер и дополнительным выходом метана биомассы не наблюдается. Поэтому биомасса с низким содержанием сухого вещества и высокой прибавкой выхода метана является наиболее энергетически выгодной при

предварительной обработке экструдером.

Для обработки образцов биомассы в этом исследовании экструдер работал с производительностью 40 кг свежего вещества/ч и потреблял 3-4 кВт·ч электроэнергии. Можно рассчитать, что термический нагрев биомассы с содержанием 30% сухого вещества от 20 до 150°C потребует примерно 100 кВт·ч/т материала. Паровое отопление, эквивалентное мокрому окислению, требует примерно 250 кВт·ч/т [23]. Часть энергии можно получить из всех процессов предварительной обработки, однако потери энергии неизбежны во всех системах. Таким образом, экструдер потребляет мало энергии по сравнению с этими методами предварительной обработки.

Энергопотребление экструдера ниже, чем прирост выработки энергии после 28 и 90 дней разложения (рис. 3, 4).

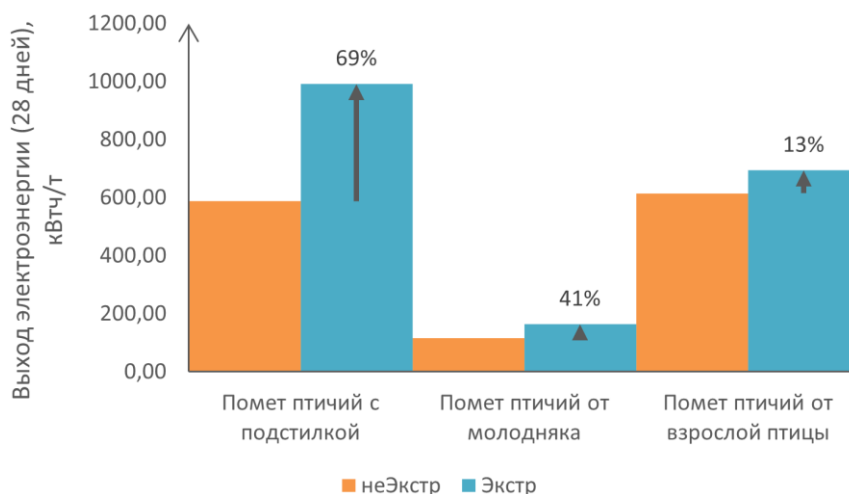


Рис. 3. Выход электроэнергии (кВт·ч/т) через 28 дней в зависимости от типа биомассы. Запас электрической энергии экструдированного образца представляет собой энергетический эквивалент выхода метана за вычетом энергопотребления экструдера (процентное значение над каждым столбцом – увеличение за счет экструзии по отношению к необработанной биомассе)

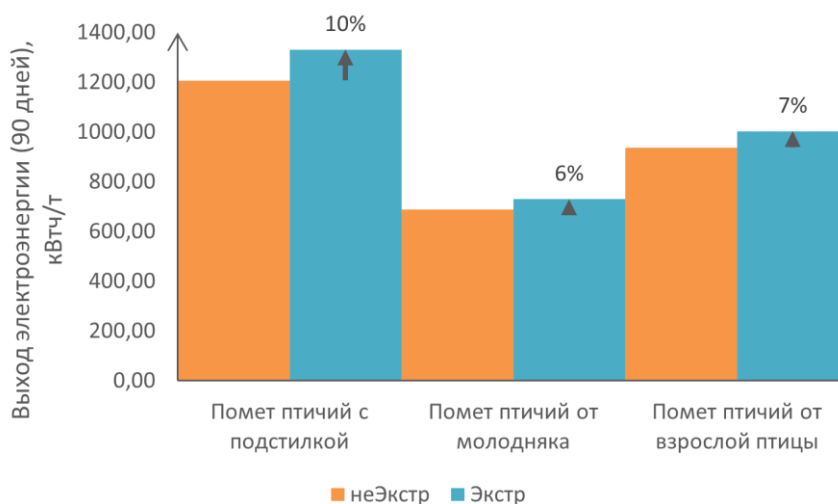


Рис. 4. Выход электроэнергии (кВт·ч/т) через 90 дней в зависимости от типа биомассы. Запас электрической энергии экструдированного образца представляет собой энергетический эквивалент выхода метана за вычетом энергопотребления экструдера (процентное значение над каждым столбцом – увеличение за счет экструзии по отношению к необработанной биомассе)

Оценивали путем сравнения электрического энергетического эквивалента выхода метана из неэкструдированного материала с электрическим энергетическим эквивалентом выхода метана из экструдированного материала без затрат электрической энергии на экструдер. Общее увеличение выхода электроэнергии составило 31% через 28 дней и 15% через 90 дней. Оба оцениваемых фактора показали статистически значимое изменение. При этом относительное увеличение было эквивалентно фактическому увеличению на 64 и 43 кВт·ч/т биомассы, соответственно.

Помет птичий с подстилкой и помет птичий от молодняка показали увеличение выхода электроэнергии на 69 и 41% через 28 дней и на 10 и 6% через 90 дней. Таким образом, в соответствии с данными о повышении выхода метана наиболее энергетически выгодной биомассой для экструзионной обработки является помет птичий с подстилкой.

Лишь немногие методы предварительной обработки ранее показали положительный энергетический баланс, несмотря на более значительное увеличение выхода метана. Например, мацерация, несмотря на низкое энергопотребление оборудования, не оказалась энергетически выгодной [9]. Причиной энергетического преимущества экструдера по сравнению с другими низкоэнергетическими методами может быть высокий прирост выхода метана в течение более длительного периода процесса разложения. В целом, химические добавки и энергоемкое оборудование являются серьезными негативными факторами в энергетическом балансе выхода. Тот факт, что экструдер продемонстрировал положительный энергетический баланс с увеличением производства метана до 70% после 28-дневного времени выдержки при периодических испытаниях в мезофильных условиях, делает экструзию достаточно эффективной технологией.

Заключение. Экструзия проводилась для улучшения анаэробного сбраживания различных типов сельскохозяйственной биомассы. Производство метана увеличилось на 14-70% через 28 дней и на 9-10% через 90 дней анаэробного сбраживания. Экструзионная обработка интенсифицировала разложение разлагаемых соединений и создала условия для разложения некоторых условно не разлагаемых соединений. Установлено, что воздействие экструдера более значимо для биомассы, включающей частицы размером более 1 мм. Через 90 дней сбраживания обработанной биомассы эффективность экструдера оценивалась следующим образом: наиболее эффективным являлся помет птичий с подстилкой, на втором и третьем месте помет птичий от молодняка и помет птичий от взрослой птицы. Увеличение электрического эквивалента выхода метана при использовании экструзионной обработки сырья после 28-дневного и 90-дневного сбраживания биомассы составило 13-69 и 6-10%, соответственно.

Список источников

1. Zeng S., Jang H. M., Park S., Park S., Kan E. Effects of mechanical refining on anaerobic digestion of dairy manure // ACS omega. 2021. Vol. 6, № 26. P. 16934–16942.
2. Climent M., Ferrer I., del Mar Baeza M., Artola A., Vázquez F., Font X. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions // Chemical Engineering Journal. 2007. Vol. 133, № 1–3. P. 335–342.
3. Zhang B., Zhao Y., Wang F., Ji M. Evaluation of Ca(OH)₂ disintegration on high-solid sludge floc structures and subsequent anaerobic digestion // Ecological Engineering. 2020. Vol.158. P. 106030.
4. Bougrier C., Battimelli A., Delgenes J. P., Carrere H. Combined ozone pretreatment and anaerobic digestion for the reduction of biological sludge production in wastewater treatment // Ozone: Science and Engineering. 2007. Vol. 29, № 3. P. 201–206.
5. Liu J., Jia R., Wang Y., Wei Y., Zhang J., Wang R., Cai X. Does residual H₂O₂ result in inhibitory effect on enhanced anaerobic digestion of sludge pretreated by microwave-H₂O₂ pretreatment process? // Environmental Science and Pollution Research. 2017. Vol. 24. P. 9016–9025.
6. Achinas S., Achinas V., Euverink, G. J. W. A technological overview of biogas production from biowaste // Engineering. 2017. Vol. 3, № 3. P. 299–307.
7. Karunanithy C., Muthukumarappan K. Influence of extruder temperature and screw speed on pretreatment of corn stover while varying enzymes and their ratios // Applied biochemistry and biotechnology. 2010. Vol. 162. P. 264–279.
8. Deng B., Wu J., Liu X., Ma Q., Tao X., Qi K., Xu Z. Effects of extruded corn with different gelatinization degrees on feed preference, growth performance, nutrient digestibility, and fecal microbiota of weaning piglets // Animals. 2023. Vol. 13, № 5. P. 922.

9. Zhu D., Che L., Yu B., Chen D. Extruded Enzyme-Added Corn Improves the Growth Performance, Intestinal Function, and Microbiome of Weaning Piglets // *Animals*. 2022. Vol. 12, № 8. P. 1002.
10. Fayose F. T., Agbetoye L. A. S. Characterizing the Specific Mechanical Energy Requirement for Maize and Cassava Processing from a Locally Developed Extruder. 2012.
11. Pilarski K., Pilarska A. A., Witaszek K., Dworecki Z., Żelaziński T., Ekielski A., Michniewicz J. The impact of extrusion on the biogas and biomethane yield of plant substrates // *Journal of Ecological Engineering*. 2016. Vol.17, № 4. P. 264–272.
12. Hjorth M., Gränitz K., Adamsen A. P., Møller H. B. Extrusion as a pretreatment to increase biogas production // *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102, № 8. P. 4989–4994.
13. Русакова И. В., Касатиков В. А., Кравченко М. Е. Агробиологическая оценка вермикомпоста и вермигумата // *Плодородие*. 2007. № 1. С. 36–37.
14. Соболева О. М., Колосова М. М. Повышение микробиологической безопасности отходов животноводства после электромагнитной обработки // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2016. №10 (144). С. 73–78.
15. Ковальчук А. Н., Ковальчук Н. М., Кузин В. А. Развитие эффекта пастеризации при обеззараживании навоза методом кавитации // *Эпоха науки*. 2015. № 4. С. 327–335.
16. Субботин И. А., Сало Т., Васильев М. В. Сравнение методов анализа навоза и помёта, используемых в странах региона Балтийского моря // *АгроЭкоИнженерия*. 2020. № 3 (104). С. 75–87.
17. Hu Y., Cai X., Xue Y., Du R., Ji J., Chen R., Li Y. Y. Recent developments of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment and bioenergy recovery: Focusing on novel configurations and energy balance analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 356. P. 131856.
18. Hu Y., Cai X., Du R., Yang Y., Rong C., Qin Y., Li, Y. Y. A review on anaerobic membrane bioreactors for enhanced valorization of urban organic wastes: Achievements, limitations, energy balance and future perspectives // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 820. P. 153284.
19. Bougrier C., Delgenes J. P., Carrère H. Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield // *Process Safety and Environmental Protection*. 2006. Vol. 84, № 4. P. 280–284.
20. Garuti M., Langone M., Fabbri C., Piccinini S. Monitoring of full-scale hydrodynamic cavitation pretreatment in agricultural biogas plant // *Bioresource technology*. 2018. Vol. 247. P. 599–609.
21. Moreno C. R., Fernández P. C. R., Rodríguez E. O. C., Carrillo J. M., Rochín S. M. Changes in nutritional properties and bioactive compounds in cereals during extrusion cooking // *Extrusion of metals, polymers and food products*. 2018. P. 104–124.
22. Appiah-Nkansah N. B., Zhang K., Rooney W., Wang D. Ethanol production from mixtures of sweet sorghum juice and sorghum starch using very high gravity fermentation with urea supplementation // *Industrial crops and products*. 2018. Vol. 111. P. 247–253.
23. Chandel A. K., Chan E. S., Rudravaram R., Narasu M. L., Rao L. V., Ravindra P. Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal // *Biotechnol Mol Biol Rev*. 2007. Vol. 2, № 1. P. 14–32.
24. Mutungwazi A., Awosusi A., Matambo T. S. Comparative functional microbiome profiling of various animal manures during their anaerobic digestion in biogas production processes // *Biomass and Bioenergy*. 2023. Vol. 170. P. 106728.
25. Arshad M., Bano I., Khan N., Shahzad M. I., Younus M., Abbas M., Iqbal M. Electricity generation from biogas of poultry waste: An assessment of potential and feasibility in Pakistan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 1241–1246.

References

1. Zeng, S., Jang, H. M., Park, S., Park, S. & Kan, E. (2021). Effects of mechanical refining on anaerobic digestion of dairy manure. *ACS omega*, 6(26), 16934–16942.
2. Climent, M., Ferrer, I., del Mar Baeza, M., Artola, A., Vázquez, F. & Font, X. (2007). Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. *Chemical Engineering Journal*, 133(1–3), 335–342.
3. Zhang, B., Zhao, Y., Wang, F. & Ji, M. (2020). Evaluation of Ca(OH)₂ disintegration on high-solid sludge floc structures and subsequent anaerobic digestion. *Ecological Engineering*, 158, 106030.
4. Bougrier, C., Battimelli, A., Delgenes, J. P. & Carrere, H. (2007). Combined ozone pretreatment and anaerobic digestion for the reduction of biological sludge production in wastewater treatment. *Ozone: Science and Engineering*, 29(3), 201–206.

5. Liu, J., Jia, R., Wang, Y., Wei, Y., Zhang, J., Wang, R. & Cai, X. (2017). Does residual H₂O₂ result in inhibitory effect on enhanced anaerobic digestion of sludge pretreated by microwave-H₂O₂ pretreatment process? *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 9016–9025.
6. Achinas, S., Achinas, V. & Euverink, G. J. W. (2017). A technological overview of biogas production from bio-waste. *Engineering*. 2017, 3 (3), 299–307.
7. Karunanithy, C. & Muthukumarappan, K. (2010). Influence of extruder temperature and screw speed on pre-treatment of corn stover while varying enzymes and their ratios. *Applied biochemistry and biotechnology*, 162, 264–279.
8. Deng, B., Wu, J., Liu, X., Ma, Q., Tao, X., Qi, K. & Xu, Z. (2023). Effects of extruded corn with different gelatinization degrees on feed preference, growth performance, nutrient digestibility, and fecal microbiota of weaning piglets. *Animals*, 13(5), 922.
9. Zhu, D., Che, L., Yu, B. & Chen, D. (2022). Extruded Enzyme-Added Corn Improves the Growth Performance, Intestinal Function, and Microbiome of Weaning Piglets. *Animals*, 12(8), 1002.
10. Fayose, F. T. & Agbetoye, L. A. (2012). Characterizing the Specific Mechanical Energy Requirement for Maize and Cassava Processing from a Locally Developed Extruder.
11. Pilarski, K., Pilarska, A. A., Witaszek, K., Dworecki, Z., Żelaziński, T., Ekielski, A. & Michniewicz, J. (2016). The impact of extrusion on the biogas and biomethane yield of plant substrates. *Journal of Ecological Engineering*, 17(4), 264–272.
12. Hjorth, M., Gränitz, K., Adamsen, A. P. & Møller, H. B. (2011). Extrusion as a pretreatment to increase biogas production. *Bioresource Technology*, 102(8), 4989–4994.
13. Rusakova, I. V., Kasatikov, V. A. & Kravchenko, M. E. (2007). Agrobiological evaluation of vermicompost and vermiguimate. *Plodorodie (Fertility)*, 1, 36–37 (in Russ.).
14. Soboleva, O. M. & Kolosova, M. M. (2016). Improving the microbiological safety of animal waste after electromagnetic treatment. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Bulletin of the Altai State Agrarian University)*, 10 (144), 73–78 (in Russ.).
15. Kovalchuk, A. N., Kovalchuk, N. M. & Kuzin, V. A. (2015). Development of the effect of pasteurization in the disinfection of manure by the method of cavitation. *Epokha nauki (The Age of Science)*, 4, 327–335 (in Russ.).
16. Subbotin, I. A., Salo, T. & Vasiliev, M. V. (2020). Comparison of manure and manure analysis methods used in the countries of the Baltic Sea region. *AgroEkolnzheneriya (AgroEcoEngineering)*, 3 (104), 75–87 (in Russ.).
17. Hu, Y., Cai, X., Xue, Y., Du, R., Ji, J., Chen, R. & Li, Y. Y. (2022). Recent developments of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment and bioenergy recovery: Focusing on novel configurations and energy balance analysis. *Journal of Cleaner Production*, 356, 131856.
18. Hu, Y., Cai, X., Du, R., Yang, Y., Rong, C., Qin, Y. & Li, Y. Y. (2022). A review on anaerobic membrane bioreactors for enhanced valorization of urban organic wastes: Achievements, limitations, energy balance and future perspectives. *Science of The Total Environment*, 820, 153284.
19. Bougrier, C., Delgenes, J. P. & Carrère, H. (2006). Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield. *Process Safety and Environmental Protection*, 84(4), 280–284.
20. Garuti, M., Langone, M., Fabbri, C. & Piccinini, S. (2018). Monitoring of full-scale hydrodynamic cavitation pre-treatment in agricultural biogas plant. *Bioresource technology*, 247, 599–609.
21. Moreno, C. R., Fernández, P. C. R., Rodríguez, E. O. C., Carrillo, J. M. & Rochín, S. M. (2018). Changes in nutritional properties and bioactive compounds in cereals during extrusion cooking. *Extrusion of metals, polymers and food products*, 104–124.
22. Appiah-Nkansah, N. B., Zhang, K., Rooney, W. & Wang, D. (2018). Ethanol production from mixtures of sweet sorghum juice and sorghum starch using very high gravity fermentation with urea supplementation. *Industrial crops and products*, 111, 247–253.
23. Chandel, A. K., Chan, E. S., Rudravaram, R., Narasu, M. L., Rao, L. V. & Ravindra, P. (2007). Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal. *Biotechnol Mol Biol Rev*, 2(1), 14–32.
24. Mutungwazi, A., Awosusi, A. & Matambo, T. S. (2023). Comparative functional microbiome profiling of various animal manures during their anaerobic digestion in biogas production processes. *Biomass and Bioenergy*, 170, 106728.
25. Arshad, M., Bano, I., Khan, N., Shahzad, M. I., Younus, M., Abbas, M. & Iqbal, M. (2018). Electricity generation from biogas of poultry waste: An assessment of potential and feasibility in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1241–1246.

Информация об авторах:

Д. И. Фролов – кандидат технических наук, доцент;
А. А. Курочкин – доктор технических наук, профессор;
М. А. Потапов – аспирант.

Information about the authors:

D. I. Frolov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
A. A. Kurochkin – Doctor of Technical Sciences, Professor;
M. A. Potapov – post-graduate student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.08.2023; одобрена после рецензирования 25.09.2023; принята к публикации 2.10.2023.

The article was submitted 11.08.2023; approved after reviewing 25.09.2023; accepted for publication 2.10.2023.