

УДК 620.952:502.575:631.576.331.2

DOI: 10.31040/2222-8349-2023-0-4-58-70

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ОСОБЕННОСТИ БИОДЕГРАДАЦИИ ЗЕРНОВОЙ ПЫЛИ ПРИ ЕЕ ПЕРЕРАБОТКЕ В БИОГАЗ

© И.В. Мирошниченко

Пыль, образующаяся в процессе сбора, транспортировки, переработки и хранения зерна, вариабельна и сложна по составу. Ее количество может достигать 26% от массы сырья. Из-за способности к самовозгоранию данный отход относят к 3-му классу опасности, а при попадании в организм человека он может причинить вред здоровью, поэтому на зерноперерабатывающих предприятиях принимают меры по снижению концентрации зерновой пыли в воздухе. С другой стороны, пыли, образующиеся на определенных этапах переработки зерна, в силу своего химического состава являются ценным сырьем, потеря которого нежелательна. В мировой литературе описываются такие способы переработки аспирационной зерновой пыли, как гидролиз и составление питательных сред для микроорганизмов, брикетирование и сжигание, использование в компостировании, а также конверсия в биогаз.

Цель данной работы – изучить особенности переработки в биогаз аспирационных зерновых пылей разных сельскохозяйственных культур и определить их энергетический потенциал и биоразлагаемость. В результате проведенных нами лабораторных исследований установлено, что удельный выход биогаза и метана из зерновой пыли сои составил $186.37 \pm 58.89 - 230.30 \pm 21.90$ и $95.54 \pm 36.95 - 122.17 \pm 15.39$ мл/г оСВ соответственно; из зерновой пыли ячменя – соответственно $165.06 \pm 9.37 - 191.41 \pm 5.65$ и $86.45 \pm 6.37 - 100.18 \pm 6.65$ мл/г оСВ. Концентрация метана в биогазе в разных вариантах составила от 46.75 ± 7.14 до $52.75 \pm 1.60\%$. При утилизации 1 тонны данных зерновых пылей на биогазовой станции можно получить от 278.70 до 382.25 кВт электрической и от 285.50 до 391.57 кВт тепловой энергии. Степень разложения органического вещества субстратов в нашем исследовании в целом невысокая – от 5.61 ± 0.08 до $5.91 \pm 0.37\%$. Таким образом, установлено, что изученные в данной работе зерновые пыли можно рассматривать как перспективный ко субстрат для существующих или планируемых биогазовых станций. Рекомендуемая продолжительность переработки – не более 35 дней.

Ключевые слова: аспирационная зерновая пыль, утилизация отходов, биогаз, биодegradация.

Введение. Зерно по массе произведенной в России продукции стоит на третьем месте после нефти и угля и является стратегическим экспортным продуктом нашей страны. Оно собирается с полей в виде зерновой массы, которая на предприятиях зерноперерабатывающей промышленности очищается от сорных примесей, сушится, сортируется, хранится [1]. Элеваторы, зернохранилища, мукомольные и комбикормовые заводы, хлебокомбинаты являются существенными источниками загрязнения воздуха пылью. Для сокращения логистических затрат они, как правило, располагаются вблизи или на территории городов. В результате трения зерен друг о друга образуется пыль, представляющая собой ценную высокобелковую фракцию муки, потеря которой крайне нежелательна [2]. Масса отходов, содержащих зерновую пыль, достигает 26% массы сырья, а на долю пыли приходится

12.6% от общего количества отходов производства [1]. В состав зерновой пыли могут входить также частицы почвы, зерна и другого растительного материала, плесень, бактерии, следы сельскохозяйственных химикатов и экскременты насекомых, грызунов, птиц. Присутствие тех или иных компонентов зависит от сельскохозяйственной культуры, условий выращивания и сбора урожая, от методов хранения и обработки зерна [3].

Воздействие зерновой пыли на организм человека может привести к поражению кожи, верхних дыхательных путей, развитию бронхита, пневмокониоза, вызвать проблемы с желудочно-кишечным трактом и раздражение глаз [2, 3]. Но особая опасность связана с ее способностью легко воспламеняться и образовывать при соединении с кислородом в определенной концентрации взрывоопасную пылевоздушную

смесь [2]. При работающем оборудовании зерновая пыль поднимается в воздух производственного помещения, здесь же присутствует достаточное количество источников возгорания – короткое замыкание, статическое электричество, перегрев подшипника, сход ленты, засыпанная норья, сварочные работы, резка металла и т.д. – поэтому без своевременной очистки воздуха может возникнуть угроза пылевого взрыва [4, 5]. Взрывоопасность пыли зависит от ее концентрации, размера и состава частиц, их влажности и температуры, а также от влажности и температуры воздуха промышленной площадки [2]. Хотя проблему распространения зерновой пыли в окружающую среду нельзя полностью устранить, нормативные акты требуют ее значительного ограничения за счет использования эффективных систем пылеулавливания [3].

Зерновая пыль является одним из малоиспользуемых видов отходов мукомольного производства, тем не менее, поиски решения данной проблемы ведутся учеными разных стран. В последние десятилетия во всем мире большое внимание уделяется экологичности технологий переработки отходов; в этой связи перспективным представляется использование для этих целей микроорганизмов и их консорциумов [6]. Так, одним из способов переработки зерновой пыли является проведение гидролиза полисахаридов; на полученных моносахаридах культивируют дрожжевые микроорганизмы. В Оренбургском государственном университете разработана технология утилизации аспирационных отходов мукомольных предприятий с получением кормовых дрожжей путем гидролиза сырья разбавленными минеральными кислотами при атмосферном давлении [1].

По мнению Straume I. и Dubrovskis V. (2020), зерновая пыль может быть спрессована в брикеты и сожжена. Другим вариантом ее переработки может стать производство биогаза, при этом в ней, в отличие от других видов пыли, отсутствуют вещества, ингибирующие деятельность микрофлоры биореактора – например, компоненты красок и лаков [7]. Материал этот достаточно сухой, его можно хранить в рассыпном или гранулированном виде, он не подвержен плесневению в процессе хранения [3]. Al-Mahasneh M. с соавт. (2008) считают перспективным компостирование зерновой пыли и ее введение в корма для животных. Они отмечают, что, используя зерновую пыль для

производства биогаза, следует учитывать чересчур высокое отношение в ней углерода к азоту, однако значение данного показателя можно снизить до оптимального путем смешивания с богатыми азотом субстратами. А из-за слишком низкого содержания влаги зерновую пыль необходимо смешивать с водой или жидкими субстратами [3].

Определение удельного выхода биогаза и метана из конкретного субстрата осуществляется путем постановки эксперимента в биореакторах периодического действия (batch-эксперимент) и имеет важное практическое значение – полученные данные используются при проектировании и эксплуатации биогазовых станций и служат базой для расчета их основных параметров (объем биореактора и газгольдера, объем и кратность загрузки и др.), в том числе позволяют составлять наиболее удачные комбинации субстратов. В зарубежной литературе большее внимание уделяется анаэробной ферментации отходов переработки риса (рисовой шелухи), в меньшей степени – отходов переработки других культур – гречихи, пшеницы, кукурузы и т.д. Исследований биогазовой продуктивности зерновой пыли ячменя и сои до настоящего времени не проводилось. Значительное количество исследований, связанных с анаэробной переработкой богатых труднорастворимыми веществами материалов направлено на повышение эффективности производства биогаза путем их предварительной обработки. Sun J. с соавт. (2019) установили, что удельный выход метана из зерновых оболочек пшеницы составляет 68.00 мл/г оСВ, а предварительная выдержка сырья в эффлюенте биогазовой станции, работающей на курином помете, способствует повышению данного показателя на 91.10% (до 130.00 мл/г оСВ) [8]. Elsayed M. с соавт. (2016) считают целесообразным введение зерновой пыли в биореактор для корректировки соотношения углерода и азота в системе [9], несмотря на присутствие в их составе лигнина и воска, затрудняющих гидролиз, что можно скорректировать путем предварительной химической обработки – например, раствором щелочи [10].

Elsayed M. с соавт. (2016) установлено, что при анаэробной ферментации соломы и осадка сточных вод введение в сбраживаемую смесь зерновых оболочек гречихи способствует увеличению удельного выхода метана на 39.26% [9]. В дальнейших исследованиях авторы вы-

явили, что наиболее оптимальное соотношение инокулята к субстрату при переработке данных отходов – 3 : 1, выход метана при этом в 1.06–1.74 раза выше, чем при других соотношениях, и составляет 493.70 мл/г оСВ [11].

Просвирников Д.Б. с соавт. (2022) добились 1.4–1.8-кратного увеличения биогазовой продуктивности шелухи полбы путем ее предварительной активации паровзрывной обработкой: максимальный выход биогаза составил 141.7 мл/г субстрата, содержание метана – 54 об. % [12]. С учетом химического состава шелухи полбы (в среднем около 93.67% оСВ [13]) удельный выход биогаза в данном эксперименте составил 151.28 мл/г оСВ после паровзрывной обработки и 108.06 мл/г оСВ – без нее.

Yang L., Yebo L. (2014), Matin H.H.A. и Hadiyanto (2018) более перспективной для переработки богатых целлюлозой отходов – например, рисовой шелухи – считают анаэробную ферментацию с повышенным содержанием сухого вещества в биореакторе и с предварительной подготовкой субстратов [14, 15]. При этом оптимальное значение массовой доли сухого вещества в биореакторе составляет 20–30%; содержание сухого вещества свыше 30% может привести к снижению выхода биогаза на 17% [16, 17, 18].

В России биогазовые технологии применяются, главным образом, для переработки отходов, однако при необходимости их продукция способна заменить магистральный природный газ и централизованное энергоснабжение. В Московской области находится самая крупная в России биогазовая станция «Полигон Тимохово» (10 МВт), станции меньшей мощности действуют в Республике Татарстан, в Курской, Калужской, Оренбургской областях и др. Большинство из перечисленных регионов также является крупнейшими в стране производителями зерновых и зернобобовых культур, занимая 7 – 13-ю строки в рейтинге по итогам прошлого года (за исключением Московской и Калужской областей) [19], поэтому можно предположить, что здесь же будут образовываться довольно большие объемы аспирационной зерновой пыли, которая может быть использована в качестве сырья на действующих биогазовых станциях.

В Белгородской области с 2012 г. действуют две биогазовые станции – «Байцуры» и «Лучки» мощностью 0.5 и 3.6 МВт соответственно. Станция «Байцуры» была построена как пилотный проект для изучения возможности

анаэробной ферментации отходов в регионе. Изначально ее использовали для утилизации жидкого навоза свиней, но позже перевели на растительное сырье [20]. Станция «Лучки» была запланирована, прежде всего, для переработки отходов мясокомбината и навоза свиней селекционно-гибридного центра, ее мощность изначально составляла 2.4 МВт. Путем изменения рецептуры перерабатываемого сырья сотрудникам станции удалось найти альтернативу кукурузному силосу, что позволило в 1.5 раза увеличить мощность объекта без строительства дополнительных реакторов [21]. В настоящее время обе станции работают как объекты по утилизации отходов, заключая договоры с различными предприятиями в регионе и за его пределами. При этом на станции «Лучки» перерабатывается широчайший спектр субстратов, включая трудноразлагаемые – например, лузга подсолнечника, опилки, гофрокартон и др. [22]. Производимая электроэнергия направляется в сеть и оплачивается энергетической компанией по «зеленому» тарифу – разница в стоимости единицы энергии не превышает стоимость потерь (около 10 МВт в сутки) при поступлении электроэнергии в Белгородскую область от Курской АЭС. В Белгородской области альтернативными источниками энергии производится порядка 4.3 МВт – с этой точки зрения в регионе дополнительно могут быть построены объекты альтернативной энергетики общей мощностью 5.7 МВт [23].

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации поставило задачу подведомственным ему вузам изучить вопросы использования пыли аспирационной, содержащей минеральные примеси, образующейся в процессе сбора, транспортирования и хранения зерна (письмо ректорам вузов, подведомственных Минсельхозу России, № 13/2492 от 24.09.2021 г.). В связи с наличием в Белгородской области действующих биогазовых станций мы предложили рассмотреть возможность анаэробной ферментации данного отхода. Таким образом, целью нашей работы стало изучение особенностей переработки в биогаз аспирационных зерновых пылей разных сельскохозяйственных культур и определение их энергетического потенциала и биоразлагаемости при утилизации в реакторе биогазовой установки. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: осуществить анаэробную ферментацию аспирационной зерновой пыли злаковой и бобовой культуры

(ячменя и сои) в лабораторных условиях; определить выход и состав получаемого биогаза; изучить особенности биodeградации разных групп веществ, входящих в состав отходов, и рассчитать степень разложения содержащегося в них органического вещества.

Материал и методы. Исследования проведены на базе лаборатории по изучению биогазовых технологий и испытательной лаборатории ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина» (ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ).

Материал исследования – пыль аспирационная, образовавшаяся в процессе сбора, транспортирования и хранения бобовой и злаковой культур – сои и ячменя, инокулят (жидкая биомасса) с действующей биогазовой станции.

Химический состав сырья изучали в испытательной лаборатории Белгородского ГАУ, каждый образец исследовали в двух повторениях. Массовую долю влаги, сухого вещества (СВ) и органического вещества (оСВ) в субстратах и инокуляте определяли соответственно по ГОСТ 26713-85 и ГОСТ 26714-85 [24, 25], содержание сырого протеина определяли по методу Кьельдаля [26], сырой клетчатки – по методу Хеннеберга и Штомана [27], сырого жира – по методу Сокслета [28], безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) – путем вычисления разницы между 100% и суммой массовой доли влаги, сырой золы, сырого жира, сырого протеина и сырой клетчатки; энергетический потенциал субстратов (выход биогаза и метана) и степень разложения органического вещества определяли по «VDI 4630...» [29].

В лаборатории по изучению биогазовых технологий Белгородского ГАУ был проведен batch-эксперимент по определению объема и

качественного состава биогаза, вырабатываемого в процессе анаэробной ферментации полученных образцов сырья на протяжении 35 суток. При постановке, проведении эксперимента и обработке результатов исследований учитывали рекомендации, приведенные в «VDI 4630...» [29]. В качестве биореакторов использовали стеклянные емкости объемом 500 мл каждая. Подогрев до $+37\pm 0.2^\circ\text{C}$ осуществляли на водяной бане, перемешивание – автоматически с помощью магнитных мешалок. Образующийся биогаз собирали в полиэтиленовые пакеты объемом 3 л каждый. Объем газа определяли вручную с помощью герметичной стеклянной колбы с поршнем и градуировкой, объемную долю метана в биогазе – с помощью портативного газоанализатора Optima-7 Biogas. Пробы газа отбирали еженедельно в одно и то же время.

Для обеспечения сравнимости полученных результатов объем газа приводили к нормальным условиям (н. у.) по формуле (1):

$$V_0 = \frac{P \cdot V \cdot T_0}{T \cdot P_0}, \quad (1)$$

где V_0 – объем сухого газа при н. у., мл; V – зарегистрированный объем газа, мл; P – давление газа в момент измерения, мбар; P_0 – атмосферное давление при н. у.; $P_0 = 1013$ мбар; T_0 – температура воздуха при н. у.; $T_0 = 273$ К; T – температура биогаза, К.

Инокулят предварительно процедили через сито с диаметром отверстий 2 мм. Часть каждого образца зерновой пыли разделили на фракции – просеяли через сито с диаметром отверстий около 2 мм – и таким образом получили по 2 варианта каждого субстрата: мелкую фракцию и смесь мелкой и крупной фракций (т. е. пыль непросеянную, исходный образец) (рис. 1).



Рис. 1. Материал исследований (слева направо): инокулят, пыль сои (вверху – непросеянная, внизу – мелкая фракция), пыль ячменя (вверху – непросеянная, внизу – мелкая фракция)

В качестве «нулевого» варианта выступил инокулят без добавления субстратов, в качестве экспериментальных – зерновые пыли с добавлением инокулята. «Нулевой» вариант служит для так называемой «корректировки» результатов, полученных в экспериментальных вариантах, для установления биогазовой продуктивности конкретного субстрата без учета влияния инокулята. Каждый вариант исследовали в трех повторениях. Количество инокулята и субстрата в реакторе рассчитывали таким образом, чтобы соотношение массовой доли органического вещества инокулята и субстрата составляло 1.5–2:1. Рабочий объем реактора приняли за 300 мл. Варианты и нормы загрузки реакторов приведены в табл. 1.

Массовая доля СВ и оСВ в исходных субстратах и инокуляте приведена в табл. 2.

Степень разложения представляет собой количество (массу) разложенного органического вещества, выраженное в процентах от массы внесенного в реактор органического вещества. Количество разложенного органического вещества рассчитывали согласно «VDI 4630...» [29] по формуле (2):

$$M_{\text{biogas}} = V_{\text{biogas}} \left(1.96 \frac{C(\text{CO}_2)}{100} + 0.73 \frac{C(\text{CH}_4)}{100} \right) \quad (2)$$

где M_{biogas} – масса биогаза, мг; V_{biogas} – объем биогаза, мл; C – концентрация соответствующих газов в газовой смеси; 1.96 и 0.73 – плотность соответствующих газов, мг/мл.

Материалы обработаны методом вариационной статистики по Плохинскому Н.А. (1970) [30] с использованием программы Microsoft Excel. Данные представлены в виде среднего значения и ошибки средней арифметической ($M \pm m$).

Результаты и обсуждение. Биогазовая продуктивность представляет собой количество энергии, которое можно получить из субстрата при его анаэробной ферментации. Она может быть выражена через валовой или удельный выход биогаза или метана, причем удельный выход дает более точные сведения об энергетическом потенциале субстрата с учетом особенностей его состава. Валовой выход газа/метана – это объем газа/метана, полученный за все время эксперимента. Удельный выход газа/метана – это объем газа/метана, полученный на единицу внесенного органического вещества за все время эксперимента.

Т а б л и ц а 1

Варианты и нормы загрузки реакторов

Вариант	Используемый субстрат	Загружено сырья, г		Загружено оСВ на 1 реактор, г		
		субстрат	инокулят	с субстратом	с инокулятом	всего
0	- (инокулят)	–	300.00	–	68.10	68.10
1	Пыль сои просеянная (мелкая фракция)	15.04	284.96	23.37	11.51	34.89
2	Пыль ячменя просеянная (мелкая фракция)	14.62	285.38	23.41	11.53	34.94
3	Пыль сои непросеянная	14.14	285.86	23.45	11.55	34.99
4	Пыль ячменя непросеянная	14.16	285.84	23.44	11.55	34.99

Т а б л и ц а 2

Массовая доля СВ и оСВ в исходных субстратах и инокуляте, $M \pm m$, $n=3$

Материал исследований	СВ, %	оСВ, % от СВ
Инокулят	11.945±0.798	68.416±1.924
Пыль сои просеянная (мелкая фракция)	89.335±0.110	85.670±0.423
Пыль ячменя просеянная (мелкая фракция)	89.430±0.288	88.179±0.359
Пыль сои непросеянная	88.241±0.257	92.523±0.378
Пыль ячменя непросеянная	89.198±0.758	91.422±1.818

Биогазовая продуктивность субстратов, $M \pm m$, $n=3$

Субстраты	Валовой выход, мл		Удельный выход, мл/г оСВ		Содержание метана, %
	биогаза	метана	биогаза	метана	
Инокулят («нулевой» вариант)	988.14± 227.91	442.70± 101.36	14.51± 3.35	6.50± 1.49	44.92± 0.60
Пыль сои просеянная (мелкая фракция)	2651.20± 252.13	1406.46± 177.23	230.30± 21.90	122.17± 15.39	52.75± 1.60
Пыль ячменя просеянная (мелкая фракция)	1902.98± 108.06	996.67± 73.41	165.06± 9.37	86.45± 6.37	52.27± 0.89
Пыль сои непросеянная	2152.21± 680.08	1103.30± 426.68	186.37± 58.89	95.54± 36.95	46.75± 7.14
Пыль ячменя непросеянная	2210.29± 65.30	1156.86± 76.82	191.41± 5.65	100.18± 6.65	52.23± 1.91

В табл. 3 приведены валовой и удельный выход биогаза и метана из инокулята и из субстратов с корректировкой (т.е. за вычетом среднего количества газа/метана, полученного в данном варианте из инокулята).

В нашем эксперименте по биогазовой продуктивности лидирует просеянная пыль сои; по удельному выходу биогаза и метана она превосходит просеянную пыль ячменя соответственно на 28.33 и 29.24%, непросеянную пыль сои – соответственно на 19.08 и 21.80%, а непросеянную ячменную пыль – соответственно на 16.89 и 18.00% (если принимать наибольшее значение за 100%).

Наибольшее содержание метана также в варианте с мелкой фракцией пыли сои. В вариантах с просеянной и непросеянной пылью ячменя значение данного показателя несколько ниже – соответственно на 0.48 и 0.52%, а в варианте с непросеянной пылью сои оно самое низкое – здесь разница с наилучшим результатом составила 6.00%.

Если сравнивать биогазовую продуктивность просеянной и непросеянной пыли одной и той же культуры, отмечается следующая закономерность: в вариантах с пылью сои значение показателей выше в варианте с мелкой фракцией, а в вариантах с пылью ячменя – наоборот, за исключением концентрации метана в биогазе – впрочем, разница по данному показателю в вариантах с пылью ячменя незначительна и составляет всего лишь 0.04%.

В исследованиях Tae-Kyung Y. с соавт. (1993) удельный выход метана и концентрация метана в биогазе из зерновой пыли были выше, чем в нашем эксперименте и составили в разных вариантах соответственно 162.00–215.00 мл/г оСВ и 53.66–56.87%. Ферментацию данные авторы осуществляли в течение

12 дней, что может отразиться на результатах, так как скорость образования биогаза и его состав значительно отличаются в разные периоды эксперимента [31]. В исследованиях Sun J. с соавт. (2019) удельный выход метана из зерновых оболочек пшеницы был в 1.01–1.16 раза ниже, чем в нашем эксперименте из зерновой пыли ячменя [8]. В работе Просвирникова Д.Б. с соавт. (2022) удельный выход биогаза из шелухи полбы даже при ее предварительной обработке был в 1.09–1.27 раза ниже, по сравнению с аналогичным показателем шелухи злаковой культуры в наших исследованиях [12].

Динамика образования биогаза и метана из изученного нами сырья (без корректировки по продуктивности инокулята) представлена на рис. 2 и 3.

Во всех вариантах с пылью в процессе образования биогаза отмечались два пика – в конце первой и четвертой недели эксперимента. При этом второй пик более высокий – т.е. в конце четвертой недели эксперимента синтез биогаза был наиболее интенсивным. Первый пик может свидетельствовать об относительном быстром распаде легкоразлагаемых веществ (например, простых углеводов), второй – о распаде жиров, белковых веществ и в некоторой степени клетчатки.

В процессе образования метана во всех вариантах с пылью четкий пик прослеживается лишь в конце четвертой недели эксперимента: интенсивность синтеза метана нарастала вплоть до четвертой недели эксперимента, а затем резко снизилась. При этом в вариантах с пылью сои объем образовавшегося за пятую неделю эксперимента метана был в 1.65–1.70 раза ниже, чем за первую, а в вариантах с пылью ячменя – напротив – в 1.63–3.48 раза выше. Таким образом, ячменной пыли требуется больше времени для разложения.



Рис. 2. Динамика образования биогаза из субстратов

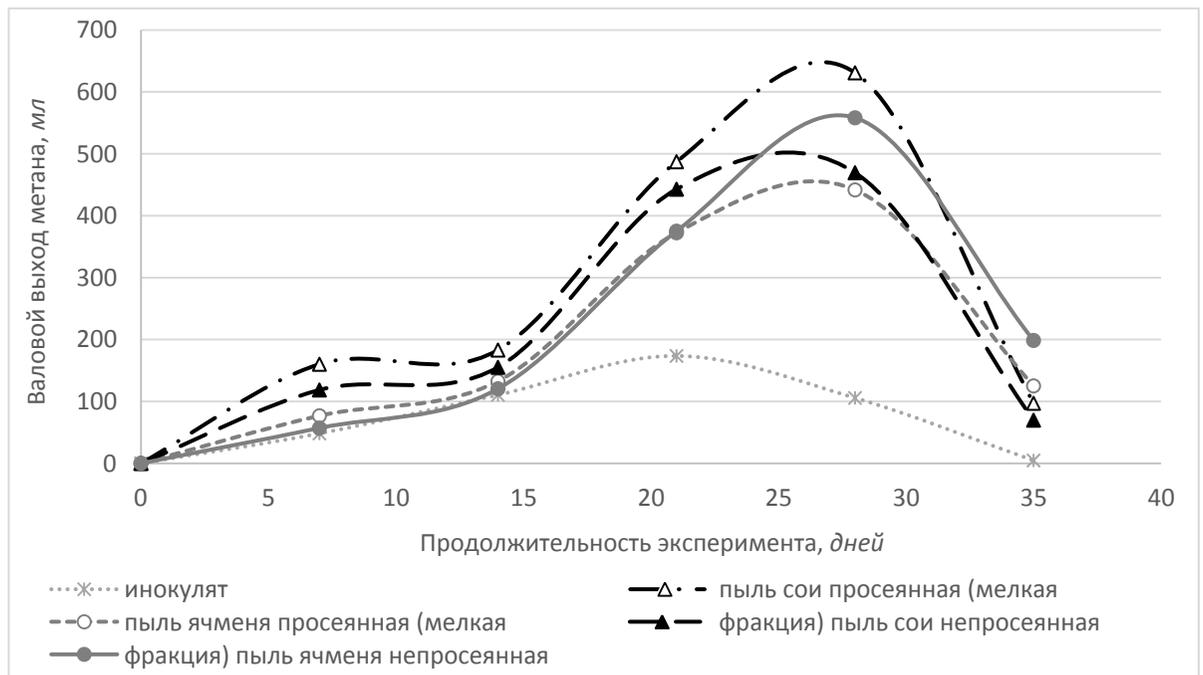


Рис. 3. Динамика образования метана из субстратов

К концу пятой недели эксперимента интенсивность синтеза газа и метана заметно снизились – следовательно, субстраты значительно исчерпали свой потенциал, и более длительная их ферментация, вероятнее всего, будет малоэффективна.

К недостаткам переработки непросеянной зерновой пыли в биогазовой установке можно

отнести ее плохую смачиваемость, особенно в варианте с пылью ячменя. Однако данный недостаток будет не столь критичен при использовании реакторов большего объема. Вспенивания ни в одном из вариантов не наблюдалось – следовательно, при переработке данных субстратов в производственных масштабах не будет необходимости в применении пеногасителей.

Содержание в исходных субстратах и инокуляте влаги, сухого вещества, сырой золы, сырого жира, сырой клетчатки, сырого протеина и БЭВ определяли отдельно в каждом виде сырья, а химический состав вариантов после анаэробной ферментации исследовали в смесях инокулята с соответствующими субстратами, за исключением «нулевого» варианта. Так как ферментация осуществлялась в смесях субстратов с инокулятом в соответствии с рассчитанными нами нормами загрузки, исходя из состава исходных субстратов и инокулята, мы вычислили содержание отдельных групп веществ в этих смесях (вариантах) (табл. 4).

Наибольшее содержание сырой золы, сырого жира и сырого протеина отмечено в вариантах с просеянными зерновыми пылями (их мелкими фракциями) – это объясняется мелким размером присутствующих в них минеральных частиц, наличием большего количества мелких частиц зерна (муки), богатых жиром и протеином, и отсутствием частиц крупного размера, богатых клетчаткой. В вариантах с непросеянными зерновыми пылями содержится больше клетчатки. БЭВ больше в вариантах с пылью ячменя (особенно – с просеянной) и с непросеянной пылью сои.

По содержанию сырого жира и сырого протеина лидируют варианты с пылью сои: с ее мел-

кой фракцией данных групп веществ больше соответственно на 1.31 и 3.19%, чем с мелкой фракцией пыли ячменя; разница по сырому жиру и сырому протеину в вариантах с непросеянными пылями составила соответственно 0.96 и 1.69%.

В варианте с просеянной пылью ячменя массовая доля БЭВ на 6.88% выше, чем с просеянной пылью сои; в вариантах с непросеянными пылями разница по данному показателю составила 3.51% в пользу ячменной пыли. Сырой клетчатки больше в вариантах с пылью сои: с просеянной – на 1.52, с непросеянной – на 1.40%, по сравнению с аналогичными вариантами с пылью ячменя.

Сырой золы на 0.84% больше в варианте с мелкой фракцией пыли сои, чем с мелкой фракцией пыли ячменя, а при сравнении вариантов с непросеянными пылями ячменная пыль превосходит по данному показателю соевую на 0.54%.

После анаэробной ферментации в вариантах с мелкой фракцией пылей отмечалось более высокое содержание сырой золы, сырого жира, сырого протеина и БЭВ, чем с непросеянными пылями: в вариантах с пылью сои разница по данным показателям составила соответственно 0.25, 0.99, 0.29 и 3.56%, с пылью ячменя – соответственно 1.07, 0.11, 0.29 и 4.53%. Содержание сырой клетчатки было выше в вариантах с непросеянными пылями: с пылью сои – на 5.13, ячменя – на 6.05%.

Т а б л и ц а 4

Содержание питательных веществ и золы в вариантах до и после анаэробной ферментации, $M \pm m$, $n=2$

Вариант	Используемый субстрат	Массовая доля, % от СВ				
		сырой золы	сырого жира	сырого протеина	сырой клетчатки	БЭВ
До переработки						
0	- (инокулят)	35.02±0.12	5.52±0.15	21.29±0.00	3.26±0.14	34.92±0.18
1	Пыль сои просеянная (мелкая фракция)	7.01±0.26	5.59±0.09	16.34±0.59	32.80±0.02	38.28±0.44
2	Пыль ячменя просеянная (мелкая фракция)	8.89±0.03	2.43±0.13	10.79±0.00	27.59±0.87	50.31±0.71
3	Пыль сои непросеянная	16.73±0.24	7.24±0.02	22.75±0.00	23.74±0.02	29.55±0.24
4	Пыль ячменя непросеянная	13.74±0.09	3.06±0.10	12.54±0.29	19.18±0.03	51.49±0.26
После переработки						
0	- (инокулят)	37.67±1.85	2.72±0.03	23.63±0.00	2.19±0.53	33.80±2.35
1	Пыль сои просеянная (мелкая фракция)	31.73±0.08	4.85±0.06	19.54±0.29	10.09±1.01	33.80±0.69
2	Пыль ячменя просеянная (мелкая фракция)	30.24±0.10	2.57±0.34	17.79±0.29	10.07±0.29	39.33±0.44
3	Пыль сои непросеянная	31.98±0.16	5.84±0.20	19.83±0.00	4.96±0.94	37.40±0.90
4	Пыль ячменя непросеянная	31.31±0.13	2.68±0.01	18.09±0.30	4.02±0.31	43.92±0.15

По массовой доле сырой золы, сырого жира, сырого протеина и сырой клетчатки варианты с пылью сои превосходили варианты с ячменной пылью: с мелкой фракцией – соответственно на 0.67, 3.16, 1.75 и 0.94%, с непросеянной пылью – соответственно на 1.49, 2.28, 1.75 и 0.02%. По содержанию БЭВ смеси с пылью сои уступали смесям с пылью ячменя 6.60 и 5.63% в вариантах с мелкой фракцией и с непросеянной пылью соответственно.

В ходе ферментации во всех вариантах отмечено снижение массовой доли сухого вещества: в варианте с просеянной и непросеянной пылью сои – соответственно на 2.28 и 2.17%, с просеянной и непросеянной пылью ячменя – соответственно на 2.09 и 1.25%. В «нулевом» варианте массовая доля сухого вещества снизилась на 0.85%.

Массовая доля сырого жира, сырого протеина и сырой клетчатки снизилась во всех вариантах с пылями. Больше деструкции подверглись жиры ячменной пыли – их содержание в вариантах с просеянной и непросеянной пылью снизилось соответственно на 2.06 и 2.00%, в вариантах с непросеянной и просеянной пылью сои значение данного показателя снизилось на 0.22 и 0.69% соответственно. Содержание сырого протеина в вариантах с просеянной и непросеянной пылью ячменя снизилось соответственно на 0.46 и 0.29%, в аналогичных вариантах с пылью сои – соответственно на 1.90 и 0.23%. Сырая клетчатка лучше разложилась в вариантах с непросеянными пылями: с пылью сои ее содержание снизилось на 4.79, ячменя – на 4.21%. В вариантах с мелкой фракцией соевой и ячменной муки данный показатель снизился на 1.95 и 0.57% соответственно. Массовая

доля БЭВ снизилась лишь в вариантах с непросеянными пылями: с пылью ячменя – на 0.16, сои – на 2.28%; в вариантах с мелкой фракцией пылей концентрация данной группы веществ увеличилась: с пылью сои – на 4.15, с пылью ячменя – на 3.87%. БЭВ, входящие в состав зерновой пыли сои (вероятно, в частицы створок бобов), лучше подлежат биодеструкции, чем БЭВ в составе непросеянной пыли ячменя.

В «нулевом» варианте массовая доля сырого жира, сырой клетчатки и БЭВ сократилась на 2.81, 1.07 и 1.11% соответственно, массовая доля сырого протеина возросла на 2.34%.

Массовая доля сырой золы возросла во всех вариантах (в большей степени в варианте с непросеянной пылью сои, в меньшей – в «нулевом»), что обусловлено разложением органического вещества субстратов и затратами его на синтез биогаза.

Немаловажной для окружающей среды является степень биодegradации отходов. Степень разложения субстрата – это количество разложенного органического вещества, выраженное в процентах от исходной массы внесенного органического вещества. Степень разложения органического вещества в протестированных в данной работе вариантах представлена в табл. 5.

Во всех вариантах (не считая «нулевого») значение показателя разнится незначительно – максимум на 0.30%, при этом наибольшее значение в варианте с непросеянной пылью сои, а наименьшее – с просеянной пылью этой же культуры. В варианте с просеянной пылью ячменя степень разложения лишь на 0.01% выше, чем с непросеянной.

Т а б л и ц а 5

Степень разложения органического вещества субстратов, $M \pm m$, $n=3$

Вариант	Валовой выход CH_4 , мл	Валовой выход CO_2 , мл	Концентрация CH_4 , %	Концентрация CO_2 , %	Масса биогаза (разложено оСВ), г	Внесено оСВ субстрата, г	Степень разложения, %
Инокулят	442.70± 101.36	545.45± 126.87	44.92± 0.60	55.08± 0.60	1.41± 0.01	68.10	2.07± 0.01
Пыль сои просеянная (мелкая фракция)	1406.46± 177.23	1244.75± 74.95	52.75± 1.60	47.25± 1.60	1.31± 0.02	23.37	5.61± 0.08
Пыль ячменя просеянная (мелкая фракция)	996.67± 73.41	906.31± 34.86	52.27± 0.89	47.73± 0.89	1.32± 0.01	23.41	5.63± 0.05
Пыль сои непросеянная	1103.30± 426.68	1048.91± 255.23	46.75± 7.14	53.25± 7.14	1.38± 0.09	23.45	5.91± 0.37
Пыль ячменя непросеянная	1156.86± 76.82	1053.43± 14.54	52.23± 1.91	47.77± 1.91	1.32± 0.02	23.44	5.62± 0.10

Степень разложения зерновой пыли в работе Тае-Kyung Y. с соавт. (1993) гораздо выше – 66.97–73.62%, однако здесь не приводятся данные о химическом составе пыли и не указывается температурный режим, при котором получен данный результат – в эксперименте использованы разные температурные диапазоны; кроме того, авторы проводили эксперимент в режиме непрерывного культивирования [31].

Массовая доля оСВ в изученных нами зерновых пылях натуральной влажности составляет от 76.53 до 81.64%, таким образом, в 1 т отходов содержится от до 0.77 до 0.82 т оСВ, из которого, учитывая полученные в нашем эксперименте данные, можно произвести от 68.17 до 93.50 м³ метана, что при его сжигании даст от 679.76 до 932.31 кВт энергии (1 м³ метана = 9.971 кВт). При утилизации данных зерновых пылей на биогазовой станции с учетом коэффициента полезного действия (КПД) двигателей внутреннего сгорания можно получить от 278.70 до 382.25 кВт электрической и от 285.50 до 391.57 кВт тепловой энергии – если, например, КПД двигателей станции по электрической энергии составляет 41%, по тепловой – 42%. Тепловая энергия обычно расходуется на нужды биогазовой станции и расположенных на ее территории помещений, а электрическая продается электросетевой компании; цена для разных регионов России различна и составляет от 8 до 16 руб./кВт. Таким образом, переработка в биогаз 1 тонны зерновой пыли позволит получить от 2229.60 до 6116.00 руб., а в случае платы предприятий за переработку отходов прибыль биогазовой станции окажется выше. Если биогазовая станция приобретает зерновую пыль как сырье, то дополнительную прибыль от ее реализации получает предприятие по переработке зерна. В условиях современного рынка в России зерновая пыль может рассматриваться и как отход, и как сырье, поэтому платить за нее может и биогазовая станция, и производящее ее предприятие; цена договорная.

Заключение. В мировой литературе, как правило, изучаются процессы совместной анаэробной переработки зерновой пыли и аналогичного сырья с другими субстратами. Однако удельный выход биогаза и метана из отдельных субстратов имеет важное практическое значение – он используется при расчете норм загрузки реакторов биогазовых станций, для определения оптимального состава перерабатываемой смеси и т.п. Нами установлено, что

удельный выход биогаза и метана из зерновой пыли сои составляет соответственно от 186.37±58.89 до 230.30±21.90 и от 95.54±36.95 до 122.17±15.39 мл/г оСВ; из зерновой пыли ячменя – соответственно от 165.06±9.37 до 191.41±5.65 и от 86.45±6.37 до 100.18±6.65 мл/г оСВ. Концентрация метана в биогазе колеблется от 46.75±7.14 до 52.75±1.60% в разных вариантах; так как данный показатель превышает 45%, полученный биогаз горюч. Биогазовая продуктивность мелкой фракции пыли сои выше, чем непросеянной пыли, биогазовая продуктивность пыли ячменя – напротив – выше в варианте с непросеянной пылью. Таким образом, целесообразна переработка пыли ячменя без ее просеивания. Однако непросеянная зерновая пыль, особенно ячменная, плохо смачивается – это следует учитывать при определении норм загрузки сырья в биореактор и при подборе ко субстратов. Степень разложения органического вещества изученных нами субстратов в анаэробных условиях в целом невысокая – от 5.61±0.08 до 5.91±0.37%, при этом лучшая биодеструкция отмечена у непросеянной пыли сои.

При утилизации 1 т изученных нами зерновых пылей на биогазовой станции с учетом коэффициента полезного действия двигателей внутреннего сгорания можно получить от 278.70 до 382.25 кВт электрической и от 285.50 до 391.57 кВт тепловой энергии; при реализации электроэнергии станция может получить от 2229.60 до 6116.00 руб.

Таким образом, аспирационные пыли, образующиеся в процессе сбора, транспортирования и хранения зерна ячменя и сои, можно рассматривать как перспективный ко субстрат для существующих или планируемых биогазовых станций. Рекомендуемая продолжительность ферментации – 28–35 дней. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации биогазовых станций – например, для расчета норм загрузки сырья в биореактор, времени нахождения субстратов в реакторе и других технологических параметров, а также при определении стоимости зерновой пыли в случае ее закупки станцией.

Автор выражает благодарность сотрудникам биогазовой станции «Байцуры» (Белгородская область) и техническому директору ООО «Трансутилизация» И.К. Мейлаху за помощь в проведении исследований и информационную поддержку.

Исследования проведены в рамках тематики научно-исследовательских работ Министрства сельского хозяйства Российской Федерации (соглашение № 082-03-2022-152/2 от 7 декабря 2022 г.).

Литература

1. Рециклинг отходов в АПК: справочник / Голубев И.Г. и др. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. 296 с.
2. Беспалов В.И., Лысова Е.П., Иванова А.С. Применение нового научного подхода к оценке свойств зерновой пыли // Инженерный вестник Дона: электронный научный журнал. 2018. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5076 (Дата обращения: 30.03.2023)
3. Grain Dust as an Energy and Food Resource / M. Al-Mahasneh et al. // Natural Resources Research. 2008. V. 17 (1). P. 13–20.
4. Лукин А.Е., Потапова С.О. К вопросу об опасности предприятий мукомольного производства // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. № 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-opasnosti-predpriyatiy-mukomolnogo-proizvodstva> (Дата обращения: 30.03.2023)
5. Осторожно – зерновая пыль // ООО НПФ «Скарабей»: официальный сайт. URL: <https://www.fumigaciya.ru/sites/default/files/public/page/2013-01/315/ostorozhnozernovayapyl.pdf?ysclid=19r3s011e3672213779> (Дата обращения: 30.03.2023)
6. Влияние внешних факторов на свойства дрожжей *Candida tropicalis* при утилизации спиртовой барды / Н.С. Евдокимов, А.А. Каленчук, В.В. Данышина, Е.А. Рогачев // Известия Уфимского научного центра РАН. 2023. № 3. С. 18–26.
7. Straume I., Dubrovskis V. Biogas production from paper dust briquettes // 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 2020. URL: <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2020/Papers/TF449.pdf> (Дата обращения: 30.03.2023)
8. Investigation on methane yield of wheat husk anaerobic digestion and its enhancement effect by liquid digestate pretreatment / J. Sun, Z. Li, X. Zhou, X. Wang, T. Liu, S. Cheng // *Anaerobe*. 2019. V. 59. P. 92–99.
9. Effect of VS organic loads and buckwheat husk on methane production by anaerobic co-digestion of primary sludge and wheat straw / M. Elsayed, Y. Andres, W. Blel, A. Gad, A. Ahmed // *Energy Conversion and Management*. 2016. V. 117. P. 538–547.
10. Tran T.P.T., Bénézet J.-Ch., Bergeret A. Rice and Einkorn wheat husks reinforced poly(lactic acid) (PLA) biocomposites: effects of alkaline and silane surface treatments of husks // *Industrial Crops and Products*. 2014. V. 58. P. 111–124.
11. Effect of inoculum VS, organic loads and I/S on the biochemical methane potential of sludge, buckwheat husk and straw / M. Elsayed et al. // *Desalination and water treatment*. 2019. V. 157. P. 69–78.
12. Технология получения биогаза из сельскохозяйственных растительных отходов с высокой биодоступностью, активированных методом паровзрывной обработки / Д.Б. Просвириков и др. // *Вестник Казанского ГАУ*. 2022. № 4(68). URL: <https://vestnik-kazgau.ru/images/archive/2022/4/14.pdf> (Дата обращения: 08.09.2023)
13. Investigation on the variation of chemical composition and *in vitro* nutritive value of spelt (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*) for ruminants / V. Sommerfeld et al. // *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2020. №104(2). P. 470–482.
14. Yang L., Yebo L. Anaerobic digestion of giant reed for methane production // *Bioresource Technology*. 2014. № 171(1). P. 233–239.
15. Matin H.H.A., Hadiyanto. Biogas Production from Rice Husk Waste by using Solid State Anaerobic Digestion (SSAD) Method // The 2nd International Conference on Energy, Environmental and Information System (ICENIS 2017). 2018. V. 31. 02007. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183102007> (Дата обращения 20.09.2023)
16. Dynamic Effect of Total Solid Content, Low Substrate/Inoculum Ratio and Particle Size on Solid-State Anaerobic Digestion / J.-C. Motte et al. // *Bioresource Technology*. 2013. № 144. P. 141–148.
17. Boontian, N. Conditions of the Anaerobic Digestion of Biomass // *International Journal of Biological, Veterinary, Agricultural and Food Engineering*. 2014. № 66(9). P. 960–964.
18. Microbial community signature of high-solid content methanogenic ecosystems / A. Abbassi-Guendouz et al. // *Bioresource Technology*. 2013. № 133. P. 256–262.
19. Валовые сборы и урожайность сельскохозяйственных культур по Российской Федерации в 2022 году: бюллетень о состоянии сельского хозяйства // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11110/document/13277> (Дата обращения 05.09.2023)
20. Биогазовая станция «Байцуры» // Русь Строй Инвест: официальный сайт. URL: <https://biogas-rsi.ru/> (Дата обращения: 05.09.2023)
21. Биогазовая станция // АльтЭнерго: официальный сайт. URL: <http://altenergo.ru/completed-projects/biogas-station/?ysclid=lm61y9eih7560447883> (Дата обращения: 05.09.2023)
22. Производство биогаза. Переработка отходов в биогаз // Трансутилизация: официальный сайт. URL: <https://transut.ru/biogas/pererabotka-v-biogaz> (Дата обращения: 05.09.2023)
23. Мирошниченко И.В., Ломазов В.А. Региональные особенности переработки отходов животноводства в биогаз: монография. Белгород: Политек, 2021. 123 с.
24. ГОСТ 26713–85. Удобрения органические. Метод определения влаги и сухого остатка / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019308?ysclid=lfvduch0yd29541724> (Дата обращения: 30.03.2023)

25. ГОСТ 26714–85. Удобрения органические. Метод определения золы / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019309?ysclid=lbmlo2pe91447486032> (Дата обращения: 30.03.2023)

26. ГОСТ 51417–99. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Определение массовой доли азота и вычисление массовой доли сырого протеина. Метод Кьельдаля / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200028421> (Дата обращения: 30.03.2023)

27. ГОСТ 31675–2012. Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097397?ysclid=lbmlqoif0207741300> (Дата обращения: 30.03.2023)

28. ГОСТ 13496.15–2016. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения массовой доли сырого жира / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140598?ysclid=lbmlx161dr165982841> (Дата обращения: 30.03.2023)

29. VDI 4630. Vergärung organischer Stoffe: Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, 2016. 132 p.

30. Плохинский Н.А. Биометрия / Н.А. Плохинский. М.: Изд-во МГУ, 1970. 367 с.

31. Methane Production by Anaerobic Digestion of Grain Dust in a Plug Flow Digester / Y. Tae-Kyung, H. Sung-Bum, P. Moon-Ki, S. Seung-Koo // Journal of Environmental Science International. 1993. V. 2(4). P. 311–316.

References

1. Recikling otxodov v APK: spravochnik / Golubev I.G. i dr. M.: FGBNU «Rocinformagrotex», 2011, 296 p.

2. Bepalov V.I., Ly`sova E.P., Ivanova A.S. Primenenie novogo nauchnogo podxoda k ocenke svoystv zernovoj py`li // Inzhenerny`j vestnik Dona: e`lektronny`j nauchny`j zhurnal, 2018, no. 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5076 (Data obrashheniya: 30.03.2023)

3. Grain Dust as an Energy and Food Resource / M. Al-Mahasneh et al. // Natural Resources Research, 2008, vol. 17 (1), pp. 13–20.

4. Lukin A.E., Potapova S.O. K voprosu ob opasnosti predpriyatij mukomol'nogo proizvodstva // Pozharnaya bezopasnost': problemy` i perspektivy`, 2018, no. 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-opasnosti-predpriyatij-mukomolnogo-proizvodstva> (Data obrashheniya: 30.03.2023)

5. Ostorozhno – zernovaya py`l' // OOO NPF «Skarabei»: oficial'ny`j sajt. URL: https://www.fumigaciya.ru/sites/default/files/public/pag_e/2013-01/315/ostorozhnozernovayapyl.pdf?ysclid=19r3s011e3672213779 (Data obrashheniya: 30.03.2023)

6. Vliyanie vneshnix faktorov na svoystva drozhzhej candida tropicalis gri utilizacii spirtovoj bardy` / N.S. Evdokimov, A.A. Kalenchuk, V.V. Dan`shina, E.A. Rogachev // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo centra RAN, 2023, no. 3, pp. 18–26.

7. Straume I., Dubrovskis V. Biogas production from paper dust briquettes // 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 2020. URL: <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2020/Papers/TF449.pdf> (Data obrashheniya: 30.03.2023)

8. Investigation on methane yield of wheat husk anaerobic digestion and its enhancement effect by liquid digestate pretreatment / J. Sun, Z. Li, X. Zhou, X. Wang, T. Liu, S. Cheng // Anaerobe, 2019, vol. 59, pp. 92–99.

9. Effect of VS organic loads and buckwheat husk on methane production by anaerobic co-digestion of primary sludge and wheat straw / M. Elsayed, Y. Andres, W. Blel, A. Gad, A. Ahmed // Energy Conversion and Management, 2016, vol. 117, pp. 538–547.

10. Tran T.P.T., Bénézet J.-Ch., Bergeret A. Rice and Einkorn wheat husks reinforced poly(lactic acid) (PLA) biocomposites: effects of alkaline and silane surface treatments of husks // Industrial Crops and Products, 2014, vol. 58, pp. 111–124.

11. Effect of inoculum VS, organic loads and I/S on the biochemical methane potential of sludge, buckwheat husk and straw / M. Elsayed et al. // Desalination and water treatment, 2019, vol. 157, pp. 69–78.

12. Texnologiya polucheniya biogaza iz sel'skoxozyajstvenny`x rastitel'ny`x otxodov s vy`sokoj biodostupnost'yu, aktivirovanny`x metodom parovzry`vnoj obrabotki / D.B. Prosvirnikov i dr. // Vestnik Kazanskogo GAU, 2022, no. 4(68). URL: <https://vestnik-kazgau.ru/images/archive/2022/4/14.pdf> (Data obrashheniya: 08.09.2023)

13. Investigation on the variation of chemical composition and in vitro nutritive value of spelt (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*) for ruminants / V. Sommerfeld et al. // Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2020, no. 104(2), pp. 470–482.

14. Yang L., Yebo L. Anaerobic digestion of giant reed for methane production // Bioresource Technology, 2014, no. 171(1), pp. 233–239.

15. Matin H.H.A., Hadiyanto. Biogas Production from Rice Husk Waste by using Solid State Anaerobic Digestion (SSAD) Method // The 2nd International Conference on Energy, Environmental and Information System (ICENIS 2017), 2018, vol. 31, 02007. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183102007> (Data obrashheniya 20.09.2023)

16. Dynamic Effect of Total Solid Content, Low Substrate/Inoculum Ratio and Particle Size on Solid-State Anaerobic Digestion / J.-C. Motte et al. // Bioresource Technology, 2013, no. 144, pp. 141–148.

17. Boontian, N. Conditions of the Anaerobic Digestion of Biomass // International Journal of Biological, Veterinary, Agricultural and Food Engineering, 2014, no. 66(9), pp. 960–964.

18. Microbial community signature of high-solid content methanogenic ecosystems / A. Abbassi-Guendouz et al. // Bioresource Technology, 2013, no. 133, pp. 256–262.

19. Valovy'e sbory' i urozhajnost' sel'skoxozyajstvenny'x kul'tur po Rossijskoj Federacii v 2022 godu: byulleten' o sostoyanii sel'skogo xozyajstva // Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11110/document/13277> (Data obrashheniya: 05.09.2023)
20. Biogazovaya stanciya «Bajczury» // Rus' Stroj Invest: oficial'ny'j sajt. URL: <https://biogas-rsi.ru/> (Data obrashheniya: 05.09.2023)
21. Biogazovaya stanciya // Al'tE'nergo: oficial'ny'j sajt. URL: <http://altenergo.su/completed-projects/biogas-station/?ysclid=lm61y9eih7560447883> (Data obrashheniya: 05.09.2023)
22. Proizvodstvo biogaza. Pererabotka otxodov v biogaz // Transutilizaciya: oficial'ny'j sajt. URL: <https://transut.ru/biogas/pererabotka-v-biogaz> (Data obrashheniya: 05.09.2023)
23. Miroshnichenko I.V., Lomazov V.A. Regional'ny'e osobennosti pererabotki otxodov zhivotnovodstva v biogaz: monografiya. Belgorod: Politerra, 2021. 123 s.
24. GOST 26713–85. Udobreniya organicheskie. Metod opredeleniya vlagi i suxogo ostatka / E'lektronny'j fond pravovy'x i normativno-texnicheskix dokumentov «Kodeks». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019308?ysclid=lfvduch0yd29541724> (Data obrashheniya: 30.03.2023)
25. GOST 26714–85. Udobreniya organicheskie. Metod opredeleniya zoly'. / E'lektronny'j fond pravovy'x i normativno-texnicheskix dokumentov «Kodeks». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019309?ysclid=lbml02pe91447486032> (Data obrashheniya: 30.03.2023)
26. GOST 51417–99. Korma, kombikorma, kombikormovoe sy'r'e. Opredelenie massovoj doli azota i vy'chislenie massovoj doli sy'rogo proteina. Metod K`el'dalya / E'lektronny'j fond pravovy'x i normativno-texnicheskix dokumentov «Kodeks». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200028421> (Data obrashheniya: 30.03.2023)
27. GOST 31675–2012. Korma. Metody' opredeleniya sodержaniya sy'roj kletchatki s primeneniem promezhutochnoj fil'tracii / E'lektronny'j fond pravovy'x i normativno-texnicheskix dokumentov «Kodeks». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097397?ysclid=lbmlqaf10207741300> (Data obrashheniya: 30.03.2023)
28. GOST 13496.15–2016. Korma, kombikorma, kombikormovoe sy'r'e. Metody' opredeleniya massovoj doli sy'rogo zhira / E'lektronny'j fond pravovy'x i normativno-texnicheskix dokumentov «Kodeks». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140598?ysclid=lbmlx161dr165982841> (Data obrashheniya: 30.03.2023)
29. VDI 4630. Vergärung organischer Stoffe: Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, 2016. 132 p.
30. Ploxinskij N.A. Biometriya / N.A. Ploxinskij. M.: Izd-vo MGU, 1970. 367 p.
31. Methane Production by Anaerobic Digestion of Grain Dust in a Plug Flow Digester / Y. Tae-Kyung, H. Sung-Bum, P. Moon-Ki, S. Seung-Koo // Journal of Environmental Science International, 1993, vol. 2(4), pp. 311–316.

ENERGY POTENTIAL AND FEATURES OF GRAIN DUST BIODEGRADATION DURING ITS PROCESSING INTO BIOGAS

© I.V. Miroshnichenko

Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin,
1, ulitsa Vavilova, 308503, Belgorod region, Russian Federation

The composition of the dust that is generated during the collection, transportation, processing and storage of grain is different and complex. The amount of grain dust can reach 26% by weight of the raw material. Due to the ability to ignite spontaneously, it is classified as a hazard class 3, and if it enters the human body, it can cause harm to health, therefore, grain processing enterprises take measures to reduce the concentration of grain dust in the air. On the other hand, the dust generated during grain processing is, due to its chemical composition, a valuable raw material, the loss of which is undesirable. The world literature describes such methods for processing aspiration grain dust as hydrolysis and the preparation of nutrient media for microorganisms, briquetting and combustion, use in composting, as well as conversion into biogas.

The purpose of this work is to study the features of processing aspiration grain dusts of various agricultural crops into biogas and determine their energy potential and biodegradability. As a result of our laboratory studies, it was established that the specific biogas and methane yield from soybean grain dust was $186.37 \pm 58.89 - 230.30 \pm 21.90$ and $95.54 \pm 36.95 - 122.17 \pm 15.39$ ml/g VS respectively; from barley grain dust – $165.06 \pm 9.37 - 191.41 \pm 5.65$ and $86.45 \pm 6.37 - 100.18 \pm 6.65$ ml/g VS respectively. The concentration of methane in biogas in different variants ranged from 46.75 ± 7.14 to $52.75 \pm 1.60\%$. When recycling 1 ton of these grain dusts at a biogas station, you can get from 278.70 to 382.25 kW of electrical energy and from 285.50 to 391.57 kW of thermal energy. The degree of decomposition of organic matter of substrates in our study is generally low – from 5.61 ± 0.08 to $5.91 \pm 0.37\%$. Thus, it has been established that the grain dusts studied in this work can be considered as a promising cosubstrats for existing or planned biogas stations. The recommended processing time is no more than 35 days.

Keywords: aspiration grain dust, waste recycling, biogas, biodegradation.