

УДК 606:637.344:620.951

DOI: 10.31040/2222-8349-2022-0-2-10-17

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И БИОДЕГРАДАЦИЯ ПОДСЫРНОЙ СЫВОРОТКИ ПРИ ЕЕ ПЕРЕРАБОТКЕ В БИОГАЗ

© И.В. Мирошниченко

Утилизация подсырной сыворотки является актуальной проблемой молокоперерабатывающей отрасли во всем мире. Производство продуктов питания и кормов на ее основе низкорентабельно и приемлемо не для каждого предприятия. В сыворотку переходит около половины питательных веществ молока, поэтому она может стать ценным энергетическим ресурсом – использоваться, например, в качестве субстрата для производства биогаза. Однако некоторые исследователи отмечают, что при переработке в биогазовой установке высокое содержание кислой сыворотки может замедлить или полностью заблокировать процесс синтеза биогаза из-за низкого значения pH. В нашем эксперименте была проведена моноферментация кислой подсырной сыворотки, и подобных негативных явлений не наблюдалось. Это может быть обусловлено особенностями используемого в эксперименте инокулята. Субстрат показал высокую продуктивность: удельный выход биогаза составил 723.65 ± 18.60 мл/г оСВ, удельный выход метана – 379.12 ± 11.55 мл/г оСВ. Таким образом, из 1 т кислой подсырной сыворотки можно произвести около 17.69 м^3 метана, при сжигании которого образуется 72.33 кВт электрической и 74.09 кВт тепловой энергии. Продажа данного количества электроэнергии в сеть позволит получить 643.73 руб. Утилизация подсырной сыворотки для биогазовой станции выгодна: данный субстрат обладает высоким энергетическим потенциалом, и цена за его утилизацию достаточно высока.

С экологической точки зрения важным показателем является степень биodeградации отхода. В реакторе лабораторной биогазовой установки степень деградации кислой подсырной сыворотки без учета растворенного в жидкой фракции неорганического углерода составила 41.42% .

Ключевые слова: отходы, подсырная сыворотка, удельный выход биогаза и метана, биodeградация.

Введение. Основные положения «Доктрины продовольственной безопасности РФ до 2030 года» предусматривают обеспечение населения высококачественной и безопасной пищевой продукцией, причем ресурсосбережение, экологическая безопасность, рациональное природопользование и охрана окружающей среды являются приоритетными направлениями в рамках реализации курса на устойчивое развитие государства [1]. Молочная промышленность относится к материалоемким и энергоемким отраслям, и реализация принципов безотходной технологии здесь возможна при условии комплексного использования всех компонентов молока. Утилизация подсырной сыворотки вызывает серьезную озабоченность во всем мире.

Сыворотка, полученная при переработке молока, является ценным питательным компонентом, в нее переходит около 50% сухих веществ молока. Часто она используется при производстве продуктов питания и кормовых

средств, что, однако, не способно обеспечить переработку ее полного объема по причине низкой окупаемости. Так как данное сырье имеет непродолжительные сроки хранения, и его транспортировка на значительные расстояния представляется проблематичной, оптимальным вариантом является внедрение технологических линий для производства продукции на основе сыворотки непосредственно на молокоперерабатывающих предприятиях. Однако не каждое предприятие имеет такую возможность. В России при производстве творога, казеина и сыров ежегодно образуется порядка 7.9 млн т сыворотки, а переработке подвергается не более $40\text{--}45\%$ [1, 2].

Таким образом, высокое содержание органических веществ в сочетании с большими объемами производства и ограниченными возможностями обработки и хранения делают сыворотку серьезной экологической проблемой. Тем не менее она может рассматриваться как

сырьевой и энергетический ресурс, а не как загрязнитель. Различные технологии промышленной переработки сыворотки позволяют полностью использовать все ее компоненты в комплексе (в виде напитков, сгущенных и сухих продуктов и т.п.), раздельно (извлеченные жир, белки, лактоза и т.д.) или получать производные ее компонентов (лактозу, глюкозо-галактозные сиропы, гидролизаты сывороточных белков и пр.). Основными вариантами переработки сыворотки в настоящее время являются: сгущение, сушка, электро- и баромембранные процессы [3]. Наиболее популярным в России способом использования сыворотки является выработка промежуточных сухих продуктов с длительным сроком хранения. Так, в Белгородской области к началу 2021 г. планировалось строительство завода по производству сухой сыворотки и концентрата сывороточного белка [4], однако до настоящего времени проект не реализован.

Одним из способов утилизации подсырной сыворотки является ее переработка в биогаз – в пользу этого свидетельствует присутствие в ней биоразлагаемых компонентов [5]. Изменения, происходящие в сыворотке при хранении, не снижают ее пригодность как сырья для биогазовой установки, что является еще одним преимуществом данного варианта утилизации.

Цель данного исследования – установить пригодность имеющейся в наличии кислой подсырной сыворотки для переработки в биогаз, изучить ее энергетический потенциал для дальнейшего использования в качестве сырья в биогазовой станции. В связи с этим были поставлены следующие задачи: изучение особенностей анаэробной ферментации кислой подсырной сыворотки, определение ее энергетического потенциала и биоразлагаемости в условиях реактора биогазовой установки.

Материал и методы исследований. Исследования проведены на базе лаборатории по изучению биогазовых технологий ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина» в рамках договора на проведение научно-исследовательской работы с предприятием, занимающимся переработкой отходов.

Материал исследования – кислая подсырная сыворотка, полученная на одном из молокоперерабатывающих предприятий Белгородской области России. Эксперимент проводили с

использованием инокулята (или инокулула – жидкой биомассы из реактора биогазовой установки, содержащей консорциум микроорганизмов, участвующих в процессах образования биогаза) из реактора биогазовой станции Лучки ООО «АльтЭнерго».

Массовую долю влаги, сухого вещества (СВ) и органического вещества (оСВ) в сыворотке и инокуляте определяли по «Messmetho-densammlung Biogas...» [6], данные методики аналогичны методикам, приведенным в российских национальных стандартах ГОСТ 26713-85 и ГОСТ 26714-85 [7, 8], энергетический потенциал (выход биогаза и метана) и степень разложения органического вещества – по «VDI 4630...» [9].

Для изучения энергетического потенциала сыворотки в лабораторных условиях был проведен эксперимент по определению объема и качественного состава биогаза, вырабатываемого в процессе анаэробной переработки полученных образцов сырья на протяжении 35 сут.; при постановке, проведении эксперимента и обработке результатов исследований учитывали рекомендации, приведенные в «VDI 4630...» [9]. В качестве биореакторов использовали стеклянные емкости объемом 500 мл каждая. Подогрев осуществляли на водяной бане, перемешивание – 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, состав газа (объемную долю метана, углекислого газа, кислорода, сероводорода) – 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):

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

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.

Инкубация образцов осуществлялась в мезофильном режиме ($+37 \pm 0.2^\circ\text{C}$) при регулярном перемешивании (в течение 15 мин каждые 2 ч).

Инокулят предварительно процедили через сито с диаметром отверстий не более 3 мм. В качестве «нулевого» варианта выступил инокулят без добавления сыворотки, в качестве экспериментального – сыворотка с добавлением инокулята. Каждый вариант исследовали в трех повторениях. Количество инокулята и сыворотки в реакторе рассчитывали таким образом, чтобы соотношение массовой доли органического вещества инокулята и сыворотки составляло 1.5–2:1. Рабочий объем реактора приняли за 300 мл. Состав исходного сырья и расчет загрузки биореакторов приведены в табл. 1.

Степень биодеградации органического вещества рассчитывали по формуле (2):

$$M_{\text{biogas}} = V_{\text{biogas}} \left(1.96 \frac{C(\text{CO}_2)}{100} + 0.73 \frac{C(\text{CH}_4)}{100} + 1.54 \frac{C(\text{H}_2\text{S})}{100} + 1.43 \frac{C(\text{O}_2)}{100} \right), \quad (2)$$

где M_{biogas} – масса биогаза, мг; V_{biogas} – объем биогаза, мл; C – концентрация соответствующих газов в газовой смеси; 1.96; 0.73; 1.54 и 1.43 – плотность соответствующих газов, мг/мл.

Полученные результаты обработаны методом вариационной статистики с использованием программы Microsoft Excel. Данные представлены в виде среднего значения и стандартной ошибки ($M \pm m$).

Результаты и их обсуждение. Валовой и удельный выход биогаза и метана из подсырной сыворотки за 35 дней эксперимента представлены в табл. 2, объемная доля метана при этом в среднем составила 52.39%. Данные приведены с корректировкой – т. е. за вычетом продуктивности инокулята.

В исследованиях большинства авторов подсырная сыворотка показывает более низкую продуктивность. Аналогичный нашему эксперимент проводили Carlini, M. с соавт. (2015), разница состояла лишь в объеме реакторов

и в комбинации субстратов – данные авторы проводили коферментацию сыворотки с куриным пометом в разных пропорциях, моноферментацию сыворотки не осуществляли. Содержание сухих веществ и органики в сыворотке и инокуляте, изученных Carlini, M. с соавт., было выше, чем в нашем эксперименте (массовая доля СВ в сыворотке и инокуляте составила соответственно 5.88 ± 2.10 и $5.48 \pm 1.95\%$, оСВ – соответственно 98.47 и 93.98% от СВ). Несмотря на это, биогазовая продуктивность сырья в их эксперименте была ниже: удельный выход биогаза составил от 245.45 до 343.08 мл/г оСВ, удельный выход метана – от 135 мл/г оСВ (55% CH_4) до 223 мл/г оСВ (65% CH_4) при соотношении сыворотки и помета соответственно 1:3 и 1:1. Авторы отмечают, что при переработке сыворотки и помета в соотношении 3:1 через 5 дней испытаний значение pH в среде упало до 5.5, и процесс остановился [10].

На рис. 1 и 2 представлена динамика валового выхода биогаза и метана из экспериментального варианта без корректировки по «нулевому» варианту (инокулят + сыворотка) и из «нулевого» варианта (инокулят) на протяжении всего эксперимента (средние значения по трем повторениям). Валовой выход газа – фактически образовавшийся объем газа из биореактора без привязки к СВ или оСВ субстрата, приведенный к н. у. В нашем эксперименте биогаз и метан синтезировались стабильно, пик их образования пришелся на конец первой недели эксперимента, затем газообразование стало плавно снижаться и к концу третьей недели прекратилось – что, вероятнее всего, обусловлено расходом питательных веществ. Повторных пиков не отмечалось – это свидетельствует о деградации легкопереваримых компонентов органического вещества (сахаров, белков, органических кислот) в первые три недели эксперимента.

Т а б л и ц а 1

Состав исходного сырья и расчет загрузки биореакторов

Сырье	Массовая доля в исходном сырье, %		Загрузка сырья, г/биореактор		
	СВ	оСВ (от СВ)	натуральной влажности (НМ)	в пересчете на СВ	в пересчете на оСВ
Сыворотка	5.34 ± 0.02	87.33 ± 0.38	222.17	10.13	7.26
Инокулят	4.56 ± 0.04	71.71 ± 0.31	77.83	4.16	3.63

Биогазовая продуктивность подсырной сыворотки

Показатель	Биогаз	Метан
Валовой выход, мл	2628.43±67.55	1377.03±41.96
Удельный выход, мл/г оСВ	723.65±18.60	379.12±11.55

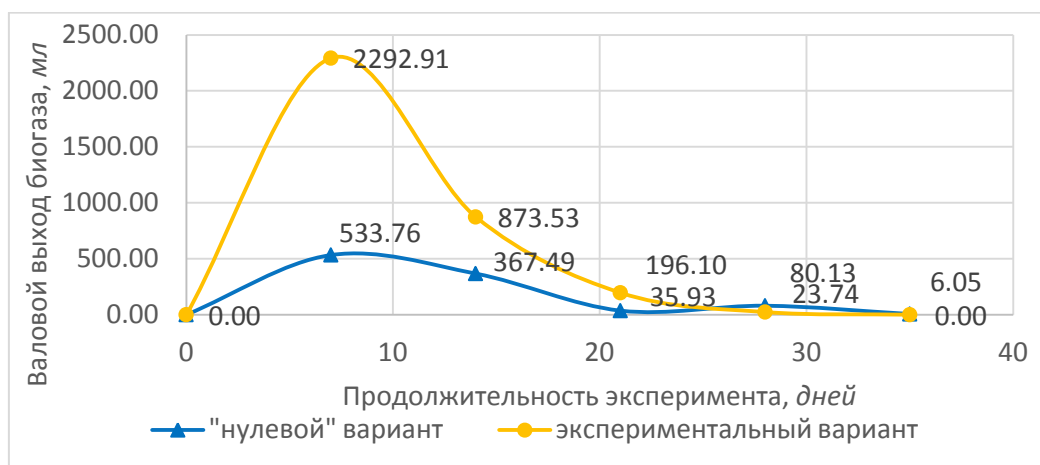


Рис. 1. Динамика образования биогаза

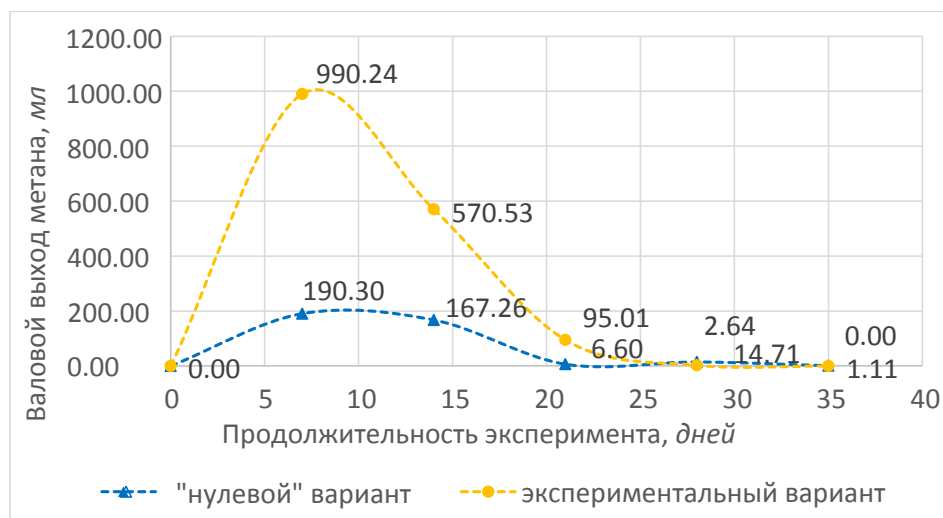


Рис. 2. Динамика образования метана

Tirichine, N. с соавт. (2020) установлено, что оптимальное содержание СВ в реакторе при переработке подсырной сыворотки – 7%, при этом удельный выход биогаза составил 401.00 мл/г оСВ (максимум газообразования пришелся на 55-й день ферментации), удельный выход метана – 215.30 мл/г оСВ (содержание CH_4 – в среднем 54%, максимальное значение в отдельно взятой пробе – 80%). Ферментацию авторы проводили в реакторах периодического действия объемом 2 л при температуре +38°C в

течение 100 дней, материал исследований – сыворотка от производства сыра Эдам и навоз крупного рогатого скота молочного направления продуктивности [11].

В работе Fallon, D. (2018) осуществлялась коферментация сыворотки и навоза крупного рогатого скота. При соотношении сыворотки и навоза 1:3, 1:1, 3:1 и 1:0 концентрация метана в биогазе составила соответственно 99.95; 93.35; 41.24 и 22.39%. Таким образом, концентрация метана при моноферментации подсырной сыво-

ротки в данном эксперименте была почти в 2 раза выше, чем в нашем. Полученные результаты автор объясняет необходимостью бактерий инокулята адаптироваться к новому субстрату [12]. В аналогичном исследовании, проведенном Labitut с соавт. (2011), навоз с подсырной сывороткой перерабатывался в соотношении 90:10 и 75:25, удельный выход метана составил соответственно 237.6 и 252.4 мл/г оСВ [13].

В работе Flores-Mendoza, А.Р. с соавт. (2020) удельный выход метана из подсырной сыворотки был ниже, чем в нашем эксперименте – 7.1 л/л сыворотки или 158.00 мл CH_4 /г оСВ (при пересчете на массовую долю оСВ сыворотки, составляющую в среднем около 4.50%). Авторы отмечают, что наилучшие результаты получены при поддержании значения рН на уровне 8 и температуре инкубации +40°C [14].

Наиболее близкие результаты к нашим получены в исследовании Pilarska А.А. с соавт. (2016): удельный выход биогаза из сыворотки составил 600.00 мл/г оСВ, метана – 338.00 мл/г оСВ; массовая доля СВ в сыворотке и инокуляте составила соответственно 4.43 и 3.46%, массовая доля оСВ – соответственно 84.21 и 71.53%. При этом в каждый реактор было внесено 850 г инокулята и 150 г сыворотки – т. е. отношение оСВ инокулята к оСВ субстрата составило около 4:1 [15].

Escalante Н. с соавт. (2018) изучали подсырную сыворотку с массовой долей органического вещества от 4.00 до 6.50% от НМ (в нашем эксперименте данный показатель составляет 4.67%), полученную на четырех молокоперерабатывающих предприятиях. Удельный выход метана из данного сырья был выше, чем в нашем эксперименте, и составил от 510.00 до 600.00 мл/г оСВ [16].

В нашем эксперименте концентрация метана в газовой смеси составила $48.97 \pm 8.84\%$, сероводорода, углекислого газа и кислорода – соответственно 0.00021 ± 0.00015 ; 29.85 ± 14.86 и $4.93 \pm 3.62\%$ (без корректировки по «нулевому» варианту).

Согласно уравнению (2), масса выделившегося биогаза (т.е. масса разложившегося оСВ) составила 4510.86 мг. С учетом того, что в биореактор было внесено 10890.00 мг оСВ, степень его биодеградации составила 41.42%. При этом $16.25 \pm 0.78\%$ газовой смеси, состав которой не был установлен (предположительно – водород, аммиак, оксиды азота), приняли за углекислый газ, что допускается методикой, приведенной в [9].

В работе Escalante Н. с соавт. (2018) степень разложения органического вещества субстратов выше – 83%, что объяснимо: авторы пользовались методикой, учитывающей также органическое вещество, растворенное в жидкой фракции в пересчете на летучие жирные кислоты [16]. Мы же принимали во внимание только органическое вещество, трансформированное в биогаз, что, учитывая задачи данного исследования, представляет больший практический интерес. Следует отметить, что степень разложения органического вещества субстратов – показатель, значения которого, полученные разными авторами, довольно сложно сравнивать: в международном научном сообществе существует большое количество методик определения данного показателя и их модификаций. Кроме того, лишь немногие авторы, исследующие биогазовую продуктивность субстратов, исследуют и степень биодеградации их органического вещества.

По данным ОГАУ «Инновационно-консультационный центр АПК», в Белгородской области России ежегодно производится около 36.9 тыс. т сыров и порядка 6.2 тыс. т творога, не считая плавленых сыров, сырных и творожных продуктов [17]. Зная выход сыворотки при производстве сыра и творога (в среднем 76 и 75% от массы исходного сырья соответственно [18]), можно рассчитать годовой объем ее образования – 135.45 тыс. т. Подсырная и творожная сыворотки по содержанию питательных веществ различаются незначительно, однако кислотность творожной намного выше. При скисании подсырной сыворотки это различие исчезает (что и произошло с сырьем для нашего эксперимента). Поэтому мы сочли возможным в дальнейших расчетах учитывать не только подсырную, но и творожную сыворотку.

Массовая доля оСВ в сыворотке натуральной влажности составляет 4.67% (точнее – 4.667%), таким образом, в 1 т сыворотки содержится 46.67 кг оСВ, из которого, учитывая полученные в нашем эксперименте данные, можно произвести 17692.47 л (или 17.69 м^3) метана, что при его сжигании даст 176.41 кВт энергии (1 м^3 метана = 9.971 кВт). При утилизации такой сыворотки, например, на биогазовой станции Лучки, с учетом коэффициента полезного действия (КПД) двигателей внутреннего сгорания получаем выработку 72.33 кВт электрической и 74.09 кВт тепловой энергии (КПД двигателей биогазовой станции Лучки по электриче-

ской энергии составляет 41%, по тепловой – 42%). Тепловая энергия расходуется, как правило, на нужды биогазовой станции, включая подогрев биореакторов, отопление технических и бытовых помещений. Электроэнергия продается электросетевой компании по цене 8.9 руб./кВт. Таким образом, переработка в биогаз 1 т кислой подсырной (или творожной) сыворотки позволит получить 643.73 руб., а переработка всего объема сыворотки, образующейся в Белгородской области за год, – 87.193 млн руб. По факту прибыль биогазовой станции окажется в несколько раз выше, так как в данном расчете мы не учитывали стоимость утилизации сыворотки, которая составляет от 500 до 1500 руб. за 1 т (т. е. предприятия платят биогазовой станции за утилизацию их отходов).

В Белгородской области отсутствует необходимость в переработке в биогаз всего объема образующейся сыворотки, так как в сухом виде она является ценным компонентом при производстве продуктов питания (например, спортивного питания, мороженого, различных десертов, молочных и кисломолочных продуктов, кондитерских и хлебопекарных изделий, в мясной промышленности и др.) и кормов, в жидком – при производстве напитков.

Заключение. Некоторые исследователи не считают моноферментацию кислой подсырной сыворотки перспективной, обуславливая это ее негативным влиянием на микрофлору из-за низкого значения pH. В нашем эксперименте кривые газообразования свидетельствуют об отсутствии угнетения процесса. Степень биodeградации органического вещества субстрата без учета растворенного в жидкой фракции неорганического углерода составила 41.42%. Кислая подсырная сыворотка при ее моноферментации показала достаточно высокую биогазовую продуктивность – удельный выход биогаза и метана составили соответственно 723.65 ± 18.60 и 379.12 ± 11.55 мл/г оСВ, что может быть связано с адаптированностью микробного консорциума инокулята – он получен на установке, которая перерабатывает широкий спектр отходов растительного и животного происхождения.

Расчеты показали, что из 1 т кислой подсырной сыворотки можно произвести около 17.69 м^3 метана – учитывая КПД двигателя внутреннего сгорания биогазовой станции, это соответствует 72.33 кВт электрической и 74.09 кВт тепловой энергии. Продажа данного

количества электроэнергии в сеть позволит получить 643.73 руб.

Таким образом, биоконверсия кислой подсырной сыворотки в биогаз является перспективным вариантом ее утилизации – например, при невозможности молокоперерабатывающих предприятий перерабатывать весь образующийся объем данного сырья или утилизировать его излишки. Для биогазовой станции переработка сыворотки весьма прибыльна с точки зрения и ее энергетического потенциала, и стоимости ее утилизации.

Автор выражает благодарность техническому директору ООО «Трансутилизация» И.К. Мейлаху за содействие в проведении исследований и за информационную поддержку.

Литература

1. Богданова Е.В. Разработка физико-химических и биотехнологических способов модификации белково-углеводного комплекса молочной сыворотки для реализации в производстве продуктов питания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.04. Воронеж, 2020. 436 с.
2. Лебеяднцева Е.А., Иванцова М.Н., Селезнева И.С. Переработка молочной сыворотки // Энерго и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н.И. (1945–2015) – Даниловских чтений. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2019. С. 469–472.
3. Короткий И.А., Плотноков И.Б., Мазеева И.А. Современные тенденции в переработке молочной сыворотки // Техника и технология пищевых производств. 2019. № 2. <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-tendentsii-v-pererabotke-molochnoy-syvorotki-1>
4. Мухин О., Лобанова И., Прытков А. Сыворотку сконцентрируют под Белгородом // Коммерсантъ (Воронеж) № 226. 07.12.2018. <https://www.kommersant.ru/doc/3821825>
5. Chatzipaschali A.A., Stamatis A.G. Biotechnological Utilization with a Focus on Anaerobic Treatment of Cheese Whey: Current Status and Prospects // Energies 2012. № 5. P. 3492–3525. <https://doi.org/10.3390/en5093492>
6. Pfeiffer D., Dittrich-Zechendorf M. Messmethodensammlung Biogas: Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich. Leipzig: Deutsches Biomassefor-

schungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), 2012. 151 p.

7. 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> (дата обращения 26.12.2021)

8. ГОСТ 26714-85 «Удобрения органические. Метод определения золы» / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019309> (дата обращения 26.12.2021)

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

10. Carlini M., Castellucci S., Moneti M. Biogas production from poultry manure and cheese whey wastewater under mesophilic conditions in batch reactor // *Energy Procedia*. 2015. № 82. P. 811–818 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.817>

11. Improved anaerobic digestion performances of whey in a batch reactor / N. Tirichine et al. // *Algerian Journal of Environmental Science and Technology* December edition. 2020. Vol. 6, № 4. P. 1612–1619. https://www.researchgate.net/publication/343532118_Improved_anaerobic_digestion_performances_of_whey_in_a_batch_reactor

12. Fallon D. Co-Digestion of Cattle Manure and Cheese Whey for Biogas Production and Characterization of Biomass Effluent. All Graduate Theses and Dissertations. Utah: Utah State University, 2018. 50 p.

13. Labatut R.A., Angenent L.T., Scott N.R. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates // *Bioresource Technology*. 2011. № 102. P. 2255–2264. doi: 10.1016/j.biortech.2010.10.035

14. Methanogenesis of raw cheese whey: pH and substrate–inoculum ratio evaluation at mesophyll temperature range / A.P. Flores-Mendoza et al. // *J. of Chemical Technology and Biotechnology*, 2020. <https://doi.org/10.1002/jctb.6391>

15. Treatment of dairy waste by anaerobic co-digestion with sewage sludge / A.A. Pilarska et al. // *Ecological Chemistry and Engineering S*. 2016. № 23(1). P. 99–115. doi: 10.1515/eces-2016-0007

16. Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the dairy sector in developing countries / H. Escalante et al. // *Waste Management*. 2018. № 71. P. 711–718. doi: 10.1016/j.wasman.2017.09.026

17. Маркетинговое исследование: рынок кисломолочных продуктов за 2015–2019 гг. Белгород: ОГАУ «Инновационно-консультационный центр АПК», 2020. 31 с.

18. Переработка творожной и подсырной сыворотки // ЗА Инжиниринг: официальный сайт. <http://3a-e.ru/otraslevye-resheniya/molochnaya-promyshlennost/pererabotka-tvorozhnoj-i-podsyroj-syvorotki/>

References

1. Bogdanova E.V. Development of physicochemical and biotechnological methods for modifying the protein-carbohydrate complex of milk whey for implementation in food production: Diss. ... Doctor of Tech. Sciences: 05.18.04. Voronezh, 2020, 436 p.

2. Lebedyantseva E.A., Ivantsova M.N., Selezneva I.S. Processing of milk whey // *Energy and resource saving. Power supply. Unconventional and renewable energy sources. Nuclear power: materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, dedicated to the memory of prof. Danilov N.I. (1945–2015) – Danilov Readings*. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2019, pp. 469–472

3. Korotkiy I.A., Plotnikov I.B., Mazeeva I.A. Modern trends in the processing of whey // *Technique and technology of food production*, 2019, no. 2, <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-tendentsii-v-pererabotke-molochnoy-syvorotki-1>

4. Mukhin O., Lobanova I., Prytkov A. Milk whey will be concentrated near Belgorod // *Kommersant (Voronezh)*, no. 226, 07.12.2018. <https://www.kommersant.ru/doc/3821825>

5. Chatzipaschali A.A., Stamatis A.G. Biotechnological Utilization with a Focus on Anaerobic Treatment of Cheese Whey: Current Status and Prospects // *Energies*, 2012, no. 5, pp. 3492–3525. <https://doi.org/10.3390/en5093492>

6. Pfeiffer D., Dittrich-Zechendorf M. Messmethodensammlung Biogas: Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich. Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), 2012, 151 p.

7. GOST 26713-85 Organic fertilizers. Method for determination of moisture and dry residue / Electronic fund of legal and normative-technical documents Kodeks. <https://docs.cntd.ru/document/1200019308>

8. GOST 26714-85 Organic fertilizers. Ash determination method / Electronic fund of legal and normative-technical documents Kodeks. <https://docs.cntd.ru/document/1200019309>

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

10. Carlini, M., Castellucci, S., Moneti, M. Biogas production from poultry manure and cheese whey wastewater under mesophilic conditions in batch reactor // *Energy Procedia*, 2015, no. 82, pp. 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.817>

11. Improved anaerobic digestion performances of whey in a batch reactor / N. Tirichine et al. // *Algerian Journal of Environmental Science and Technology* December edition, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 1612–1619. https://www.researchgate.net/publication/343532118_Improved_anaerobic_digestion_performances_of_whey_in_a_batch_reactor

improved_anaerobic_digestion_performances_of_whey_in_a_batch_reactor

12. Fallon D. Co-Digestion of Cattle Manure and Cheese Whey for Biogas Production and Characterization of Biomass Effluent. All Graduate Theses and Dissertations. Utah: Utah State University, 2018, 50 p.

13. Labatut R.A., Angenent L.T., Scott N.R. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates // *Bioresource Technology*, 2011, no. 102, pp. 2255–2264. doi: 10.1016/j.biortech.2010.10.035

14. Methanogenesis of raw cheese whey: pH and substrate–inoculum ratio evaluation at mesophyll temperature range / A.P. Flores-Mendoza et al. // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2020. <https://doi.org/10.1002/jctb.6391>

15. Treatment of dairy waste by anaerobic co-digestion with sewage sludge / A.A. Pilarska et al. // *Ecological Chemistry and Engineering S.*, 2016, no. 23(1), pp. 99–115. doi: 10.1515/eces-2016-0007

16. Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the dairy sector in developing countries / H. Escalante et al. // *Waste Management*, 2018, no. 71, pp. 711–718. doi: 10.1016/j.wasman.2017.09.026

17. Marketing research: the market of fermented milk products for 2015–2019 Belgorod: OGAU "Innovation and Consulting Center for APK", 2020, 31 p.

18. Processing of cottage cheese and cheese whey // 3A Engineering: official site. <http://3a-e.ru/otraslevyesheniya/molochnaya-promyshlennost/pererabotka-tvo-rozhnoj-i-podsyрноj-syvorotki/>

ENERGY POTENTIAL AND BIODEGRADATION OF SUBSURFACE WHEY DURING ITS PROCESSING INTO BIOGAS

© I.V. Miroshnichenko

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

Utilization of cheese whey is an actual problem of the dairy industry all over the world. The production of food and feed based on it is low-profit and not acceptable for every enterprise. About half of the nutrients in milk pass into whey, so it can become a valuable energy resource – used, for example, as a substrate for biogas production. However, some researchers note that when processed in a biogas plant, a high content of acidic whey can slow down or completely block the process of biogas synthesis due to the low pH value. In our experiment, monofermentation of acidic cheese whey was carried out, and no such negative phenomena were observed. This may be due to the features of the inoculum used in the experiment. The substrate showed high productivity: the specific yield of biogas was 723.65 ± 18.60 ml/g dm, the specific yield of methane was 379.12 ± 11.55 ml/g dm. Thus, about 17.69 m³ of methane can be produced from 1 ton of acid cheese whey, the combustion of which generates 72.33 kW of electrical energy and 74.09 kW of thermal energy. The sale of this amount of electricity to the grid will make it possible to receive 643.73 rubles. Utilization of cheese whey for a biogas station is beneficial: this substrate has a high energy potential, and the price for its disposal is quite high.

From an environmental point of view, an important indicator is the degree of biodegradation of the waste. In the reactor of a laboratory biogas plant, the degree of degradation of acid cheese whey, excluding inorganic carbon dissolved in the liquid fraction, was 41.42%.

Keywords: waste, cheese whey, specific yield of biogas and methane, biodegradation.