

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА БИОМАСС РОССИИ

Е.В. Арбузова, С.Е. Щеклеин, А.А. Холмаков, И.А. Гладиков, А.Г. Шастин

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел./факс: (343) 375-95-08, e-mail: aes@mail.ustu.ru

Заключение совета рецензентов: 21.03.12 Заключение совета экспертов: 25.03.12 Принято к публикации: 28.03.12

Представлены данные по потенциалу биомассы растительного происхождения на территории Российской Федерации, определен теоретический выход биогаза из различных биомасс при анаэробной технологии переработки. Приведена общая система уравнений, описывающая динамику всех стадий процесса и типичный график изменения выхода биогаза.

Приведены схема экспериментального стенда, общий вид экспериментальной установки и методика проведения эксперимента. Представлены результаты экспериментальных исследований повышения эффективности процессов биохимического взаимодействия путем создания развитой межфазной поверхности в результате механического измельчения фрагментов биомассы, активизации процесса при непрерывном удалении образующихся микросфер биогаза путем наложения на процесс ультразвуковых полей. Проведен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: использование потенциала биомассы, БГУ в России, эффективность конверсии биомассы, биогазовые установки, измельчение субстрата биомассы, биотехнология.

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF EFFICIENCY OF BIOMASS ENERGY POTENTIAL IN RUSSIA

E.V. Arbuzova, S.E. Shcheklein, I.A. Gladikov, A.A. Kholmakov, A.G. Shastin

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira ave., Yekaterinburg, 620002, Russia
Tel./fax: (343) 375-95-08, e-mail: aes@mail.ustu.ru

Referred: 21.03.12 Expertise: 25.03.12 Accepted: 28.03.12

A biomass of a phyto genesis potential data in territory of the Russian Federation is presented, the theoretical exit of biogas from a various biomass at anaerobic technologies of processing is resulted. The general system of the equations describing dynamics of process of all stages and the typical diagram of change biogas outlet is resulted.

Results of experimental researches of efficiency increases of processes of biochemical interaction by creation of the developed interphase surface as a result of mechanical grinding of the biomass fragments, process activation at continuous removal of formed microspheres of biogas by imposing on process of ultrasonic fields are presented. The received results are analyzed.

Keywords: use of a biomass potential, BGP of Russian Federation, efficiency of a biomass conversion, biogas plants, crushing of a biomass substratum, biotechnology.



Елена Валерьевна
Арбузова

Сведения об авторе: ассистент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ. Призер всероссийских выставок и конференций, имеет грамоты.

Образование: Уральский государственный технический университет (УГТУ-УПИ) (2004).

Область научных интересов: малая и нетрадиционная энергетика, энергетический анализ эффективности установок нетрадиционной энергетике, биоэнергетика.

Публикации: 11.



Андрей Александрович
Холмаков

Сведения об авторе: аспирант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Образование: Уральский государственный технический университет (УГТУ-УПИ) (2009).

Область научных интересов: малая и нетрадиционная энергетика, энергетический анализ эффективности установок нетрадиционной энергетике, биоэнергетика.

Публикации: 4.



Илья Александрович
Гладиков

Сведения об авторе: аспирант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ. Призер всероссийских выставок и конференций, имеет золотые медали и грамоты.

Образование: Уральский государственный технический университет (УГТУ-УПИ) (2011).

Область научных интересов: малая и нетрадиционная энергетика, энергетический анализ эффективности установок нетрадиционной энергетике, биоэнергетика.

Публикации: 3.



Арнольд Георгиевич
Шастин

Сведения об авторе: канд. техн. наук, профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ. Заслуженный энергетик РФ. Награжден орденами и медалями СССР.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1961), Уральский государственный университет (1967).

Область научных интересов: атомная энергетика, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, техническое применение мощного ультразвука.

Публикации: более 100, 20 изобретений.

В течение столетий население и промышленность России использовали топлива растительного происхождения. Растения – возобновляемый природный ресурс, элемент биосферы, преобразующий в процессе фотосинтеза углекислый газ, воду, минеральные и органические вещества в биомассу. Источником производства биомассы является продукция и отходы животноводства и пищевой промышленности [1-4].

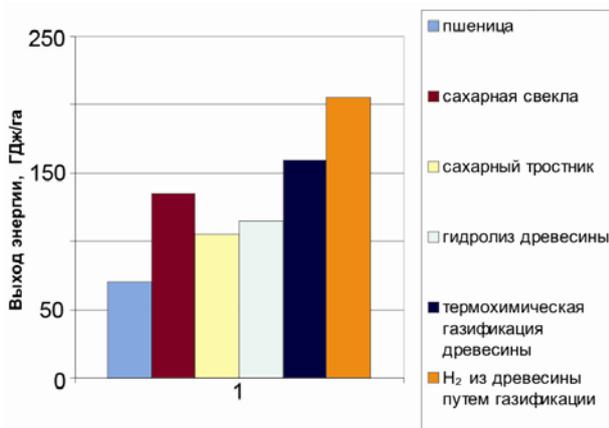


Рис. 1. Возможные объемы получения энергии с 1 га
Fig. 1. Potential volume of energy production per hectare

Ресурсы биомассы, пригодной для производства энергии, весьма значительны.

К таким видам ресурсов относятся все биомассы природного (травы, кустарники, леса) и культурного (зерновые, овощи, сахарный тростник, картофель, отходы сельскохозяйственного производства) происхождения. Некоторое представление об энергетической ценности различных биомасс дает рис. 1.

В России потенциал биомасс всех типов является одним из крупнейших в мире.

Выделение потенциала биомассы по федеральным округам позволяет получить первичное представление об обеспеченности биологическими запасами энергии регионов России. Представленные на рис. 2 цифры включают в себя потенциал как природных (леса), так и культурных (с/х территории) видов биомассы.

Традиционно регионы с развитым сельским хозяйством бедны запасами леса, и наоборот. Основные запасы биомассы леса сосредоточены на Урале, в Сибири, на Дальнем Востоке. Центральная и южная часть России обладает большим потенциалом биомассы по зерновым, сахарной свекле, картофелю.

Потенциал биомассы следует разделять на многолетний и годовой. Основную часть многолетнего потенциала составляет биомасса лесов, которая формируется десятилетиями и применение которой для использования в энергетических целях нецелесообразно.



Рис. 2. Потенциал биомассы растительного происхождения, выделенный по федеральным округам РФ, млн тонн
 Fig. 2. The potential of organic biomass allocated to the Federal Districts of Russian Federation, million tons

Таблица 1

Потенциал различных видов биомассы по федеральным округам РФ

Table 1

Potential of different types of biomass allocated to the Federal Districts of Russian Federation

Федеральный округ	Потенциал биомассы, млн тонн							
	запас древесины (общий прирост)	зерно	сахарная свекла	картофель	овощи	всего	с/х культуры	годовой потенциал
Центральный	2366,3 (45,1)	28,2	16,9	6,5	2,7	2465,7	54,3	99,4
Южный	288,7 (4,0)	16,7	0,5	2,1	2,0	313,9	21,3	25,3
Северо-западный	6340,7 (83,3)	7,8	2,2	2,4	0,9	6437,2	13,2	96,5
Дальневосточный	13375,6 (132,5)	0,6	0,0	1,8	0,9	13511,5	3,3	135,9
Сибирский	21435,0 (224,8)	19,2	1,6	5,4	2,7	21688,6	28,8	253,6
Уральский	4923,8 (59,6)	6,9	2,7	3,1	0,8	4996,8	13,5	73,1
Приволжский	3397,2 (67,8)	18,7	3,7	6,7	2,2	3496,4	31,3	99,1
Северо-Кавказский	156,9 (2,4)	1,5	0,2	0,6	0,5	162,1	2,8	5,2
Всего по России	52284,2 (619,4)	99,7	27,7	28,5	12,7	53072,2	168,6	788,0

Энергетический потенциал биомассы формируется в основном из годового прироста лесной массы, однолетних растений (травы, быстрорастущие кустарники) и сельскохозяйственных культур.

В табл. 1 представлены данные по многолетнему и годовому потенциалам биомасс по федеральным округам РФ [5].

Суммарный потенциал биомассы растительного происхождения на территории Российской Федерации составляет более 50 млрд тонн. Значение годового потенциала биомассы составляет около 800 млн тонн, что соизмеримо с объемами потребления ископаемых органических топлив (менее 1 млрд т у.т. в год).

Даже частичное вовлечение потенциала биомассы в энергетическое использование при помощи современных технологий кислотного и ферментативного гидролиза, газогенерации, пиролиза и пр. позволит получать моторные биотоплива, биогаз, твердое топливо высокой калорийности в значительных объемах. Одним из наиболее известных и дос-

тупных методов преобразования биомассы в удобное для использования биогазовое топливо является процесс анаэробного бактериального сбраживания – биогазогенерации. На рис. 3 приведены данные по теоретическому энергетическому потенциалу распространенных биомасс при данной технологии переработки [3].

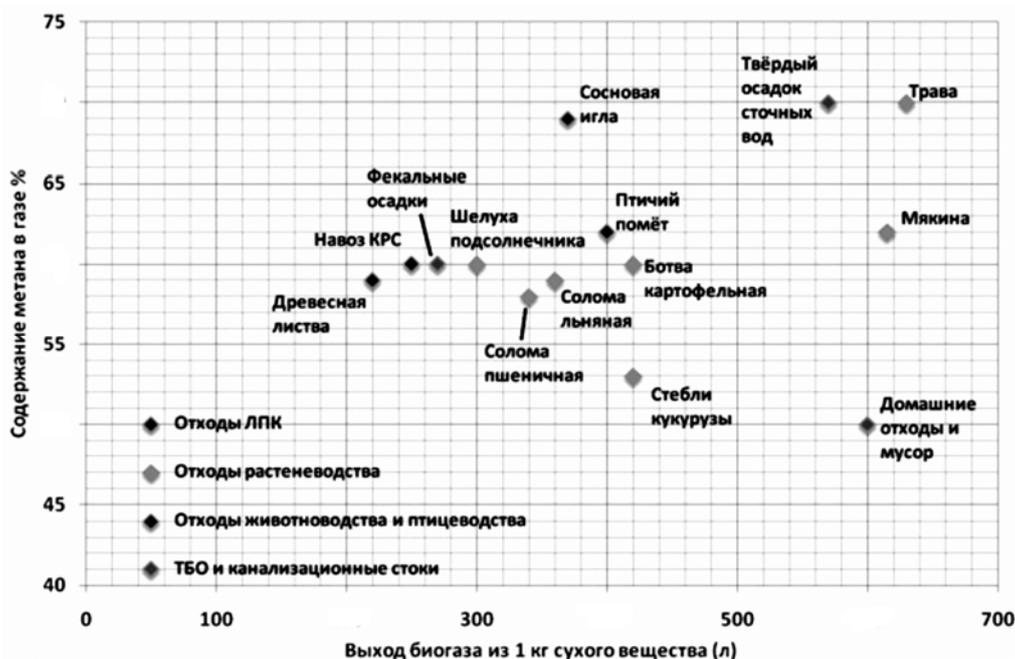


Рис. 3. Теоретический выход биогаза из различных биомасс при анаэробной технологии переработки
Fig. 3. Theoretical yield of biogas from different biomass using anaerobic digestion process

Практически с учетом наличия в биомассах не перерабатываемых в метан соединений и неполной переработки органических составляющих вводится понятие степени конверсии биомассы в биогаз (либо в метан) [6-8], характеризующее реальную возможность энергетического использования химической энергии биомассы [9]. Например, для отходов животноводства в работе [7] [10 - ??] приводятся данные для оценки степени распада углеводов органического вещества (табл. 2).

Таблица 2
Данные для оценки степени распада углеводов органического вещества

Table 2
Data for evaluation of organic substance carbohydrates disintegration degree

Субстрат	Степень распада углеводов, %
Навоз дойных коров	30
Навоз КРС (кроме коровьего)	42
Навоз свиней	58
Помет куриный	54

Анаэробное разложение органических веществ сопровождается четырьмя последовательными стадиями: гидролизом полимеров, кислотогенезом, ацетогенезом и метаногенезом [11].

Общая система уравнений, описывающая динамику всех стадий процесса биометангенерации разработана в работах [11-13], где приведены скорости биохимических реакций для каждой стадии. Указывается, что гидролиз как первая и самая медленная стадия ограничивает общую скорость всего процесса.

Теоретическая эмиссия биогаза (кмоль/т ОВ сух.) определяется решением кинетического уравнения относительно компонента С [13]:

$$n_c = n_0 \left(1 + \frac{k_1}{k_2 - k_1} e^{-k_2 \tau} - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_1 \tau} \right), \quad (1)$$

где: k_1, k_2 – константы скорости стадий ацетогенеза и метаногенеза соответственно; n_0 , кмоль, – количество углеводородной составляющей в 1 т субстрата.

В пересчете на объем биогаза, образующийся при разложении M_6 тонн сухих биодegradуемых биомасс (m^3 при н.у.):

$$V_{\text{биогаз}} = 22,4n_0M_6 \left(1 + \frac{k_1}{k_2 - k_1} e^{-k_2\tau} - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_1\tau} \right). \quad (2)$$

Функция конверсии, характеризующая полноту использования потенциала биомассы при биогазовой технологии переработки, определится из (2) в виде

$$\alpha_{\text{разл}}(\tau) = V_{\text{ор}}^{\text{факт}} = V_{\text{ор}} = 22,4n_0M_6 \left(1 + \frac{k_1}{k_2 - k_1} e^{-k_2\tau} - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_1\tau} \right). \quad (3)$$

Скорость анаэробных процессов существенно ниже, чем аэробных – они могут продолжаться месяцы и годы. Как и для обычных химических реакций, с повышением температуры скорость трансформации увеличивается. В соответствии с температурой анаэробные процессы подразделяются на психрофильные (порядка 20 °С и ниже), мезофильные (порядка 35 °С) и термофильные (выше 50 °С).

Сокращение времени сбраживания приводит к неполноте конверсии биомассы. На рис. 4 приведен типичный график изменения выхода биогаза по данным работы [14], показывающий асимптотический характер изменения процесса.

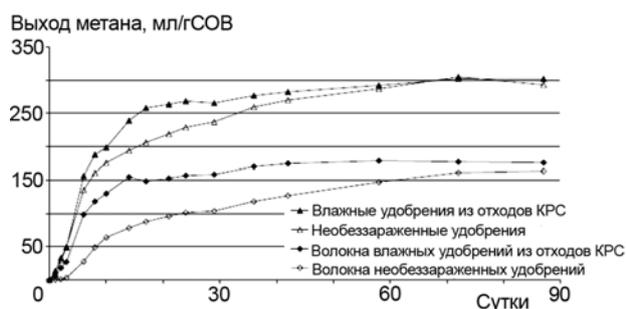


Рис. 4. График изменения выхода биогаза по данным работы [14]

Fig. 4. Diagram of change biogas yield from the data of [14]

Объем энергии, запасенной в биомассах разного вида, степень конверсии биомассы в метан детально изучались рядом исследователей [1-3], отмечается, что при неограниченной продолжительности процесса психрофильный, мезофильный и термофильный режимы обеспечивают примерно равные выходы газа и степень конверсии органического вещества.

Для целей энергетического использования представляется значимым решение следующих задач:

- достижение максимального использования биохимического потенциала биомасс (достижение максимальных коэффициентов конверсии);
- осуществление процессов конверсии в течение минимального периода времени.

Традиционно эти задачи решаются путем применения мезофильного и термофильного режимов метангенерации, существенно повышающих скорость биометаногенеза и степень конверсии биомассы. Од-

нако данные режимы нуждаются в обеспечении более высокотемпературных условий и, следовательно, дополнительного расхода энергии на их осуществление [9].

Известны менее энергозатратные методы достижения подобных результатов с применением методик физического воздействия на процесс [15].

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований повышения эффективности процессов биохимического взаимодействия путем создания развитой межфазной поверхности в результате механического измельчения фрагментов биомассы, активизации процесса при непрерывном удалении образующихся микросфер биогаза путем наложения на процесс ультразвуковых полей.

Экспериментальная установка и методика исследований

Схема экспериментального стенда для проведения исследований и его технические характеристики приведены на рис. 5 и табл. 3. Общий вид установки показан на фотографии (рис. 6).

Методика проведения исследований:

- приготовление сухого субстрата биомассы (навоз КРС) заданных размеров;
- измерение размеров частиц при помощи измерительного микроскопа;
- приготовление рабочего раствора (субстрата) заданной влажности (92-96%);
- размещение субстрата в термостатирующее устройство, обеспечивающее соответствующий температурный режим (психрофильный, мезо- либо термофильный);
- непрерывный отбор и регистрация количества и состава биогаза.

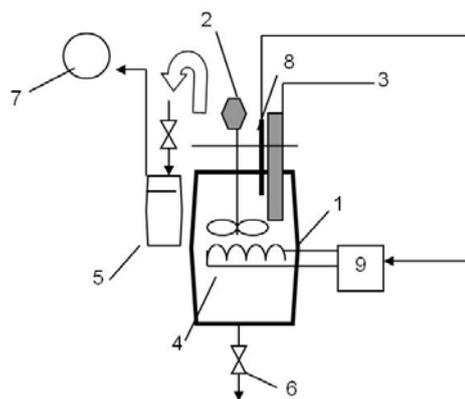


Рис. 5. Схема экспериментального стенда: 1 – биогазовая установка в тепловой изоляции; 2 – привод мешалки; 3 – магнитострикционный излучатель ультразвука; 4 – нагреватель; 5 – гидрозатвор; 6 – система дренажа; 7 – газовый счетчик; 8 – контактный термометр; 9 – регулятор нагрева

Fig. 5. Model of the test facility: 1 – biogas plant for thermal insulation; 2 – wheel drive stirrer; 3 – magnetostrictive ultrasonic transducer; 4 – heater; 5 – water trap; 6 – the drainage system; 7 – gas meter; 8 – contact thermometer; 9 – control heating

Таблица 3
Технические характеристики установки
Table 3
Technical characteristics of experimental setup

№	Параметр узла	Характеристика
1	Емкость броидильного бака, л	8
2	Электропривод мешалки тип тока напряжение, В частота, Гц мощность, Вт	переменный 220 50 100
3	Магнитоотрицательный излучатель ультразвука частота, кГц мощность, Вт	44 100-1000
4	Мощность встроенного теплообменника, Вт	1500
5	Емкость гидрозатвора, л	2
6	Температура греющей среды, °С	25-40



Рис. 6. Общий вид экспериментальной установки
Fig. 6. General view of experimental setup

Особенностью проведения работ при исследованиях влияния ультразвукового поля является размещение в объеме биореактора магнитоотрицательного излучателя ультразвуковых колебаний малой интенсивности. Для создания ультразвуковых полей регулируемой интенсивности использовались генераторы ультразвука с магнитоотрицательными преобразователями мощностью 0,1 и 1 кВт. Частота ультразвуковых колебаний составляла 44 кГц.

Результаты исследований

Исследование влияния размера фрагментов биомассы на эффективность процесса метанового брожения

Фрагментирование исходного сырья (навоза КРС) осуществлялось в осушенном виде тремя методами:

а) ручное измельчение в ступке – размер фрагментов 1-5 мм;

б) механическое измельчение в размолочной машине – размер фрагментов 0,5-2 мм,

в) высокоскоростной помол в электромеханическом блендере – размер фрагментов 0,1-0,5 мм.

Характерные микрофотографии неизмельченного и измельченного сырья приведены на рис. 7.

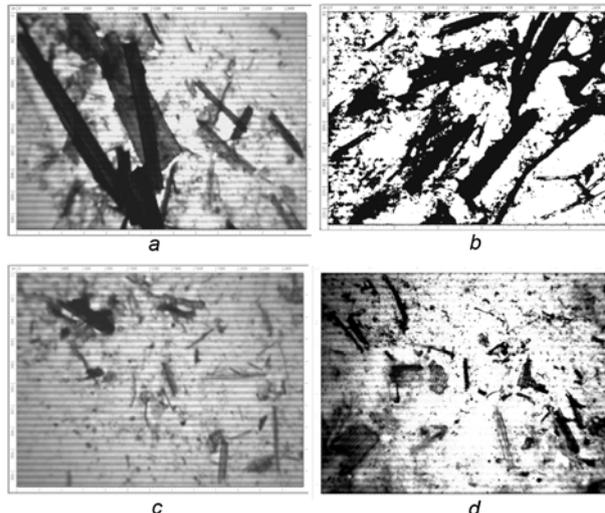


Рис. 7. Фотографии неизмельченного и измельченного (фрагментированного) субстратов: а – без измельчения; б – ручное (механическое) измельчение; с – крупный помол; д – мелкий помол

Fig. 7. Grinded and not grinded (fragmented) substrates: a – without grind; b – manual grind; c – the coarser grind; d – a fine grind

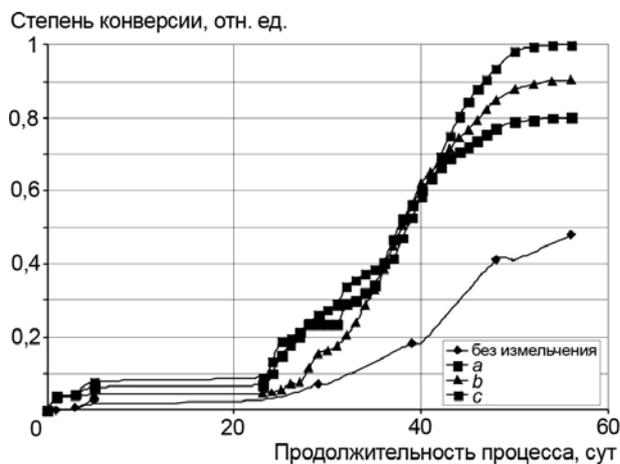


Рис. 8. Относительная степень конверсии навоза КРС в биогаз
Fig. 8. The relative degree of cow manure conversion into biogas

На рис. 8 приведены полученные данные в виде относительной степени конверсии в цикле ферментации навоза КРС при влажности субстрата 94% и мезофильных условиях протекания процесса (30 °С).

Из анализа графика можно сделать вывод о большой продолжительности стадий гидролиза и ацетатолиза, отмечаемой рядом авторов; существенном повышении скорости и глубины конверсии

биомассы при увеличении поверхности взаимодействия. Следует, однако, отметить, что по данным работы [15] чрезмерное уменьшение размеров частиц приводит к снижению эффективности процесса.

Исследование влияния ультразвукового поля на эффективность процесса метанового брожения

Известно, что воздействие ультразвуковых полей позволяет повысить эффективность обменных процессов в биологических системах [15] и в биогазовых технологиях [16].

Некоторые результаты исследований воздействия ультразвукового поля на эффективность процесса образования биогаза при ультразвуковом воздействии приведены на рис. 9.

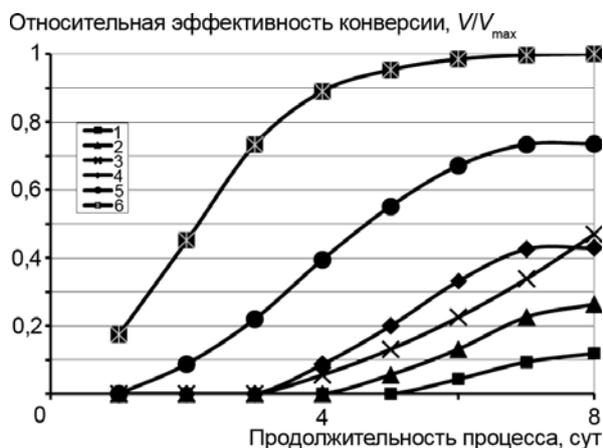


Рис. 9. Относительное изменение эффективности конверсии биомассы от продолжительности процесса: без ультразвукового воздействия: 1, 2, 3 – температуры субстрата 20, 30, 55 °C соответственно; при наложении ультразвукового поля 0,1 Вт/мл: 4, 5, 6 – температуры субстрата 20, 30, 55 °C соответственно

Fig. 9. The relative change of biomass conversion efficiency on the process duration: without ultrasound exposure: 1, 2, 3 – 20, 30, 55 °C substrate temperature, respectively; with presence of ultrasonic field 0.1 W/ml: 4, 5, 6 – temperature of the substrate 20, 30, 55 °C, respectively

Анализ полученных зависимостей указывает на значительную интенсификацию процесса газовыделения, проявляющуюся как в сокращении времени, так и в повышении объема выхода биогаза. Эффект интенсификации имеет место как при психрофильном, так и при мезофильном и термофильном режимах.

Следует, однако, отметить, что при повышении мощности ультразвукового воздействия свыше 10 Вт/мл процесс выделения как биогаза, так и углекислого газа прекращался для всех исследованных температурных режимов, что связано, по-видимому, с бактерицидным воздействием ультразвука на сообщества микроорганизмов [15].

Выводы

1. Потенциал биологических масс различного происхождения на территории РФ значителен. Объем годового прироста биомасс соизмерим с потреблени-

ем традиционных органических энергоносителей, что делает актуальным разработку современных технологий его практического использования.

2. Выполненные исследования отдельных физических воздействий на процесс биогазовой переработки такого вида биомассы, как навоз крупного рогатого скота, указывают на возможности сокращения времени переработки и повышения степени конверсии биомассы при умеренных энергетических затратах.

Список литературы

1. Безруких П.П., Арбузов Ю.Д. и др. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Под ред. Безруких П.П. СПб.: Наука, 2002.
2. Панцхава Е.С., Пожарнов В.А. Вклад биомассы в мировое производство энергии. "Коммерческая биотехнология".
3. Биомасса как источник энергии: Пер. с англ. / Под ред. Соуфера С., Заборски О. М.: Мир, 1985.
4. Биоэнергетика: мировой опыт и прогноз развития. Научное издание. М.: ФГНУ «Росинформгротех», 2008.
5. Холмаков А.А., Щеклеин С.Е. Энергетический потенциал биомасс России. Энергетика настоящего и будущего: Сб. матер. I Евроазиатской выставки и конф. 16-18 февраля 2010 г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. С. 58-62.
6. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: теория и практика: Пер. с нем. М.: Колос, 1982.
7. Корзникова М.В., Блохин А.Ю., Козлов Ю.П. Оценка степени конверсии органического вещества отходов животноводства и птицеводства в биогаз (на примере РФ) // Вестник ВГУ, Серия: Химия. Биология. Фармация. 2008. № 2. С. 108-111.
8. Барбара Эдер, Хайнц Шульц. Биогазовые установки. Практическое пособие. Пер. с нем. Компания Zorg Biogas, 2008.
9. Арбузова Е.В., Щеклеин С.Е. К проблеме энергетической эффективности биогазовых технологий в климатических условиях России // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. 2011. № 7. С. 108–110.
10. Ковалев А.А. Технологии и технико-энергетическое обоснование производства биогаза в системах утилизации навоза животноводческих ферм: дисс. д-ра техн. наук: 05.14.08. М., 1998.
11. Бейли Дж., Оллис Д. Основы биохимической инженерии. Пер. с англ. В 2-х частях. Ч. 2. М.: Мир, 1989.
12. Вавилин В.А., Васильев В.Б., Рытое С.В. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов. М.: Наука, 1993.
13. Зомарев А.М. Санитарно-гигиенический мониторинг полигонов захоронения твердых бытовых отходов (ТБО) на этапах жизненного цикла: дисс. д-ра мед. наук: 14.02.01. Пермь, 2010.
14. Hartmann H. and Ahring V.K. The Future of Biogas Production // The Environmental Microbiology/Biotechnology Research Group, BioCentrum-DTU, Building 227, Technical University of Denmark, DK - 2800 Lyngby, Denmark.
15. Акопян В.Б., Ершов Ю.А. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. М.: МГТУ им. Н.Э Баумана, 2005.
16. Голязимова О.В., Политов А.А., Ломовский О.И. Механическая активация ферментативного гидролиза лигноцеллюлозы // Химия растительного сырья. 2009. № 2. С. 59-63.