

Научная статья

УДК 663.481

DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-3-13-22

Исследование влияния ультразвукового воздействия на процессы анаэробной переработки пивной дробины в биогаз

В.В. Житков*, О.Л. Ахремчик

*Московский государственный университет пищевых производств
Россия, Москва, *vladimir.v.zhitkov@gmail.com*

Аннотация. Исследовали влияние процесса предварительной ультразвуковой обработки субстрата пивной дробины для увеличения производства биогаза из отходов пивоваренного производства. Эксперимент проводили посредством моделирования процесса синтеза биогаза в однофазном лабораторном анаэробном биореакторе для сбраживания пивной дробины бактериями комплекса анаэробных метангенетических бактерий (*Methanobacteriales*). Результаты экспериментов показывают, что производство биогаза в метаногенной фазе осуществляется более интенсивно при температурах в диапазоне 20–40°C. Содержание метана при производстве биогаза может поддерживаться на уровне более 50% при температуре выше 20°C, но ниже 60°C. Выявлено, что характеристики ацидогенной и метаногенной фаз значительно ухудшаются при понижении температуры до 20°C, поскольку при таких температурах, очевидно, микробная активность ингибируется. Соответственно, такая пониженная температура является неблагоприятной для работы ацидогенной и метаногенной фаз, в то время как умеренные температуры выше 25°C более благоприятны для повышения эффективности производства биогаза. Получено регрессионное уравнение, подтверждающее влияние температуры в биореакторе, частоты ультразвукового воздействия при предварительной обработке дробины и их совместное действие на выработку биогаза. Определены режимы переработки пивной дробины с применением ультразвука, способствующие повышению эффективности процесса получения биогаза: температура ведения процесса – 40°C; частота УЗ обработки – 50 кГц.

Ключевые слова: биотехнология; акустическое воздействие; переработка отходов; получение биогаза; дробина; биогаз

Original article

The influence of ultrasonic treatment on the anaerobic processing of brewer's spent grains into biogas

Vladimir V. Zhitkov*, Oleg L. Akhremchik

*Moscow State University of Food Production
Moscow, Russia, *vladimir.v.zhitkov@gmail.com*

Abstract. The influence of the process of preliminary ultrasonic treatment of the brewer's grains substrate to increase the production of biogas from the waste of brewing production was investigated. The experiment was carried out by simulating the process of biogas synthesis in a single-phase laboratory anaerobic bioreactor for fermentation of beer grains by bacteria of a complex of anaerobic metagenetic bacteria (*Methanobacteriales*). The experimental results show that the production of biogas in the methanogenic phase is carried out more intensively at temperatures in the range of 20–40°C. The methane content in biogas production can be maintained at more than 50% at temperatures above 20 but below 60°C. It was found that the characteristics of the acidogenic and methanogenic phases deteriorate significantly with a decrease in temperature to 20°C, since at such temperatures the microbial activity seems to be inhibited. Accordingly, such a lower temperature is unfavorable for the operation of the acidogenic and methanogenic phases, while moderate temperatures above 25°C are more favorable for increasing the efficiency of biogas production. A regression equation has been obtained that confirms the effect of temperature in the bioreactor, the frequency of ultrasonic exposure during the pretreatment of spent grain, and their combined effect on biogas production. The modes of processing brewer's grains using ultrasound have been determined, which enhance the efficiency of the biogas production process: the temperature of the process is 40°C; ultrasonic processing frequency – 50 kHz.

Keywords: biotechnology; acoustic impact; waste processing; biogas production; spent grain; biogas

Введение

Пивоваренная промышленность образует огромное количество отходов, удаление которых экономически затратно. Кроме того, их накопление в окружающей среде является экологической проблемой, что стало причиной для поиска способов сокращения производства промышленных отходов. Учитывая истощение природных ресурсов, в том числе энергетических, решение проблемы утилизации приобретает большое значение [1; 2]. Основные положения и методики переработки отходов, производимых мировой пищевой промышленностью, были разработаны учеными, среди которых А.А. Черепанов, В.М. Шрамков, В. Баадер, М. Беккер, В.М. Федотов, В.Д. Савин, С.И. Тарасов, В.И. Тумченко.

Особенно актуальной является проблематика утилизации пивной дробины, как наиболее объемного отхода пивоваренного производства. Не более 10% дробины находит свое применение в качестве компонента кормов для животноводства. Из-за особенностей состава дробины срок ее использования составляет не более 3–4 дней, после которых происходят необратимые процессы порчи. И дробина утилизируется на полигоны ТБО. При этом она обладает уникальными характеристиками, которые при наличии соответствующих технологий могут сделать ее ценным энергетическим ресурсом. Но, тем не менее, анализ научных исследований отечественных и зарубежных авторов показывает отсутствие информации о разработке энергоэффективных технологий анаэробной переработки отходов пивоваренных производств, с использованием ультразвука.

Важную роль в переработке объемов пивной дробины как ценного отхода пивоваренных производств (вторичных сырьевых ресурсов) может сыграть анаэробное сбраживание в специализированных аппаратах (биореакторах) с получением метана как ценного альтернативного источника энергии, способного заменить часть энергоресурсов предприятия. Остаток после анаэробной переработки дробины обладает низкой биохимической активностью, что делает его потенциально применимым в качестве удобрения за счет увеличения возможностей логистики. Ультразвуковая обработка сырья известна как безопасный и экологически чистый способ воздействия на трудно сбраживаемые среды, позволяя тем самым увеличить доступность сбраживаемых углеводов микроорганизмам [3; 4].

Исходя из анализа литературных данных, было принято решение о целесообразности проведения исследования анаэробного сбраживания пивной дробины для оценки влияния различной температуры и диапазона частот ультразвука на процесс в присутствии комплекса анаэробных метаногенных бактерий [5].

Цель работы – исследовать эффективность процесса анаэробной переработки пивной дробины с применением предварительной ультразвуковой обработки в качестве дополнительного активирующего воздействия на перерабатываемое с целью максимизации выработки целевого продукта – биогаза.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучить температурные режимы анаэробного метаногенного сбраживания и выбор режима, обеспечивающего выработку биогаза с максимальным содержанием метана;
- изучить режимы предварительной ультразвуковой обработки пивоваренной дробины и выбор режима выработки биогаза с максимальным содержанием метана в комбинации с оптимальным термическим воздействием.

Объекты и методы исследования

Объектами настоящего исследования стали пивоваренная дробина, произведенная на малом предприятии «Русский крафт» (Москва, Россия), и полученный из нее в процессе анаэробного сбраживания биогаз.

Методом исследования являлся процесс анаэробного сбраживания пивной дробины в лабораторном метаногенном реакторе с общим объемом 17 л., сконструированном и созданном на кафедре «Прикладная механика и инжиниринг технических систем» Московского государственного университета пищевых производств.

Схема реактора представлена на рисунке 1 и в таблице 1.

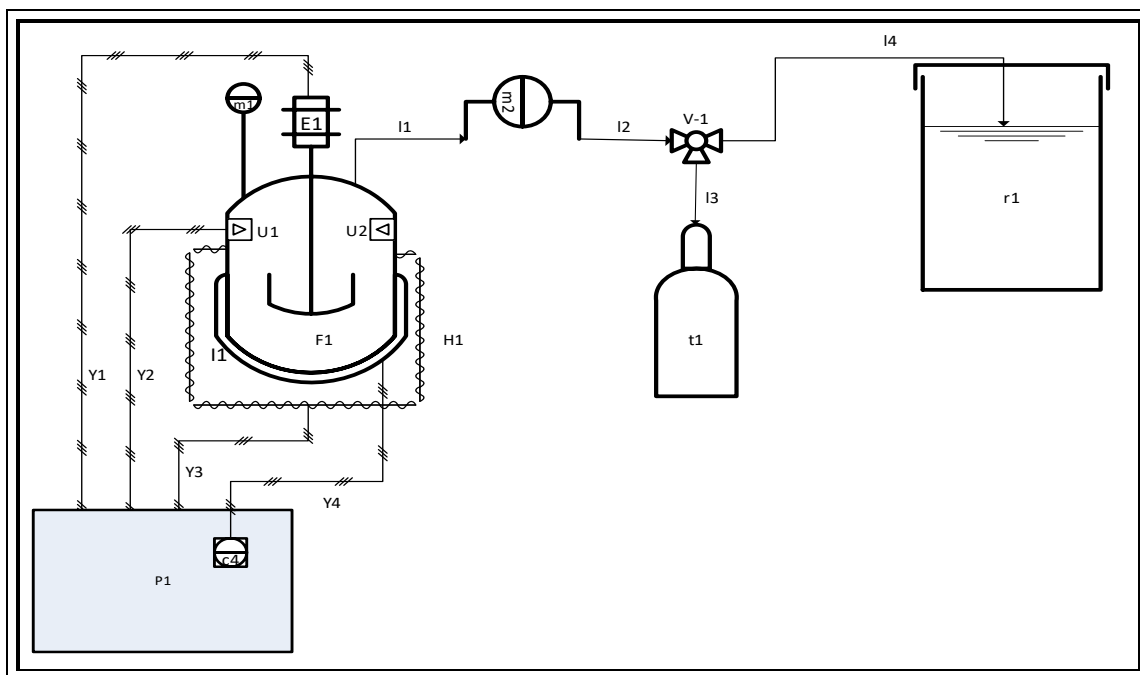


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки
Figure 1. Experimental unit

Таблица 1. Описание лабораторной установки
Table 1. The parts of the experimental unit

Индекс	Описание
F1	ферментер
E1	электропривод
H1	электрообогрев
I1	теплоизоляция
U1,2	УЗ излучатели
m1	манометр газовый
m2	расходомер газовый
C1	контроллер вращения
C2	генератор УЗ
C3	контроллер температуры
C4	pH метр
V1	клапан пробоотборный
t1	пробоотборник
r1	буферный резервуар
L1,2,3,4	газовая магистраль
P1	модуль управления
Y1,2,3,4	электрическая линия

Аналитические исследования включали в себя определение следующих параметров:

- содержание первоначальной влаги – по ГОСТ 1396.3-92 (27548.98);
- содержание «сырого» протеина – по методу Кьельдаля, ГОСТ 1396.4 (28074-89);
- содержание «сырого» жира – в аппарате Сокслета, по ГОСТ 13496.15;
- содержание «сырой» клетчатки – по Геннебергу и Штоману (модификация ЦИНАО), ГОСТ 1396.2-91;
- содержание «сырой» золы – методом сухого озоления (температура 400 – 450°C), по 26226-95;
- содержание растворимых углеводов – по Бертрану;
- содержание лигнина – по Ермакову А.И. с соавт.[13];
- содержание гемицеллюлоз – по Ермакову А.И. с соавт.[13];
- значения БПК (амперометрическим методом) и ХПК (бихроматным методом)

В биогазе определяли содержание CH₄ и окислов углерода прибором MESTEK CDG01/02.

В воде для создания суспензии и в реакционной среде определяли значение pH прибором PH-990.

Температурные режимы в биореакторе контролировались датчиками и контроллерами температуры в рамках заданной программы.

Количество выделяемого биогаза определялось по показаниям газового расходомера.

Таблица 2. Основные характеристики пивной дробины (среднее значение 4 образцов)
Table 2. Main characteristics of brewer's spent grains

Образец	БЭВ	Влага	Лигнин	Гемицеллюлоза	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырой жир	Сырая зола
Дробина пивная	35,8	7,61	34,2	14,4	25,3	23,8	4,4	4,89

Полученные аналитические данные (таблица 2) подтвердили высказанное ранее предположение о ценности пивной дробины как вторичного материального ресурса и о возможности его использования в качестве субстрата для получения биогаза.

После переработки дробины в биореакторе, образовавшийся органический остаток не исследовался. По данным из литературных источников он имеет потенциал к использованию в качестве сельскохозяйственного удобрения, так как не является настолько реакционным с окружающей средой и подлежит гораздо более длительному хранению по сравнению с исходной пивной дробинкой.

Этапы и результаты экспериментов

На первом этапе исследования были проанализированы температурные условия анаэробного сбраживания в модифицированном реакторе для оценки влияния температуры на полунепрерывное анаэробное сбраживание при переработке пивоваренной дробины в присутствии комплекса анаэробных метаногенетических бактерий [6; 7]. Метаногенная фаза процесса переработки достигает наибольшей эффективности производства биогаза в интервале температур 20–40°C [8].

Результаты анализа выработки биогаза при изменении температуры в биореакторе (рисунок 2) показали, что низкая температура (20°C) отрицательно влияет на скорость синтеза биогаза, однако обеспечивает производство биогаза высокого качества; высокая температура (60°C) приводит к ухудшению качества продукта, выражающемуся в снижении процентного содержания метана. Поэтому процесс анаэробного сбраживания пивной дробины в биореакторе следует проводить в диапазоне температур 20–40°C.

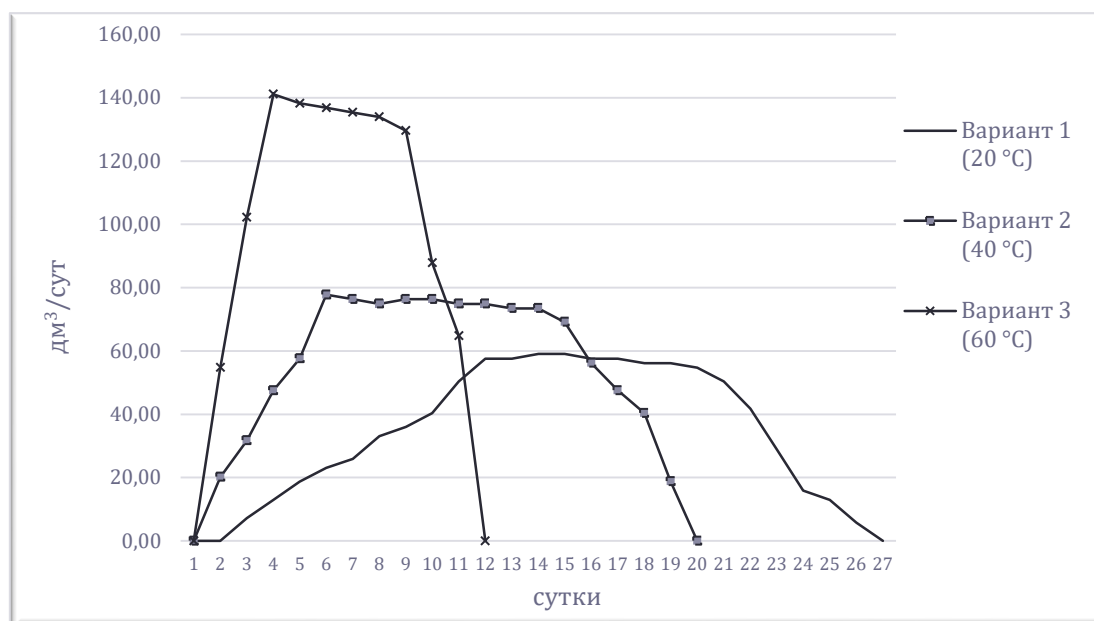


Рисунок 2 – Производство биогаза из пивной дробины в условиях изменения температуры
Figure 2. Biogas production from brewer's spent grains under temperature changes

Основной целью *второго этапа* было изучение влияния ультразвуковой предварительной обработки на производство биогаза из пивоваренной дробины. Были исследованы физические и химические изменения материала до и после предварительной обработки ультразвуком частотой 20 (рисунок 3), 40 (рисунок 4), 60 кГц (рисунок 5).

Результаты исследований показали, что применение частоты 40 кГц при температуре 40°C приводят к увеличению выхода биогаза на 83%. Одновременно достигается положительный результат в отношении содержания метана и скорости выработки биогаза.

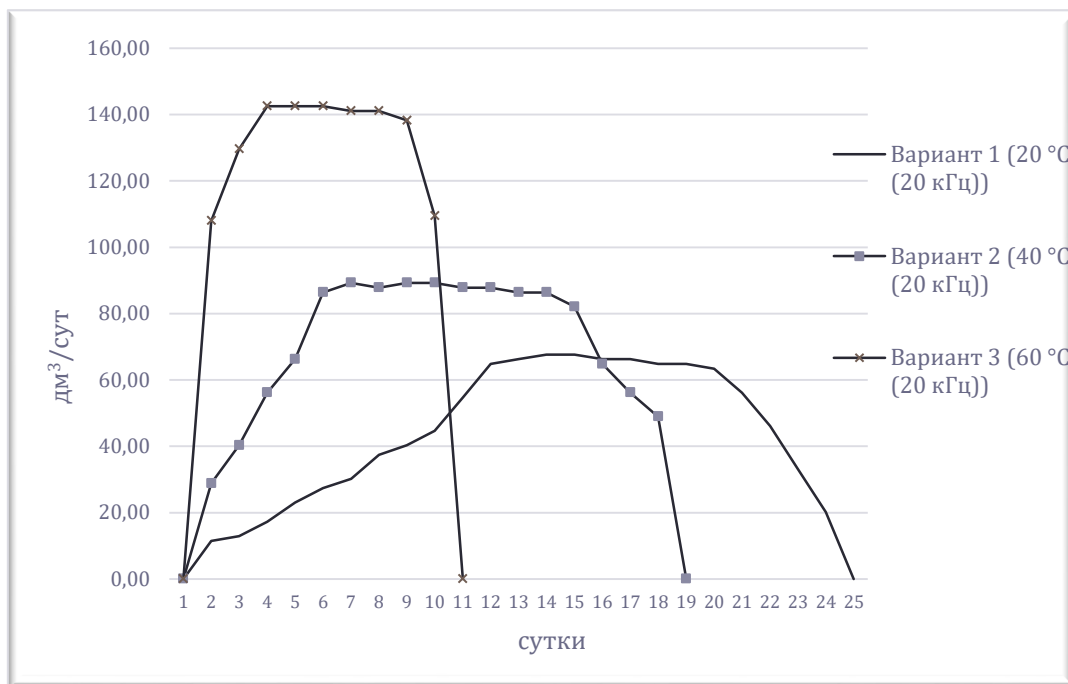


Рисунок 3 – Производство биогаза из пивной дробины при обработке ультразвуком 20 кГц
 Figure 3. Biogas production from brewer's spent grains under 20 kHz ultrasonic treatment

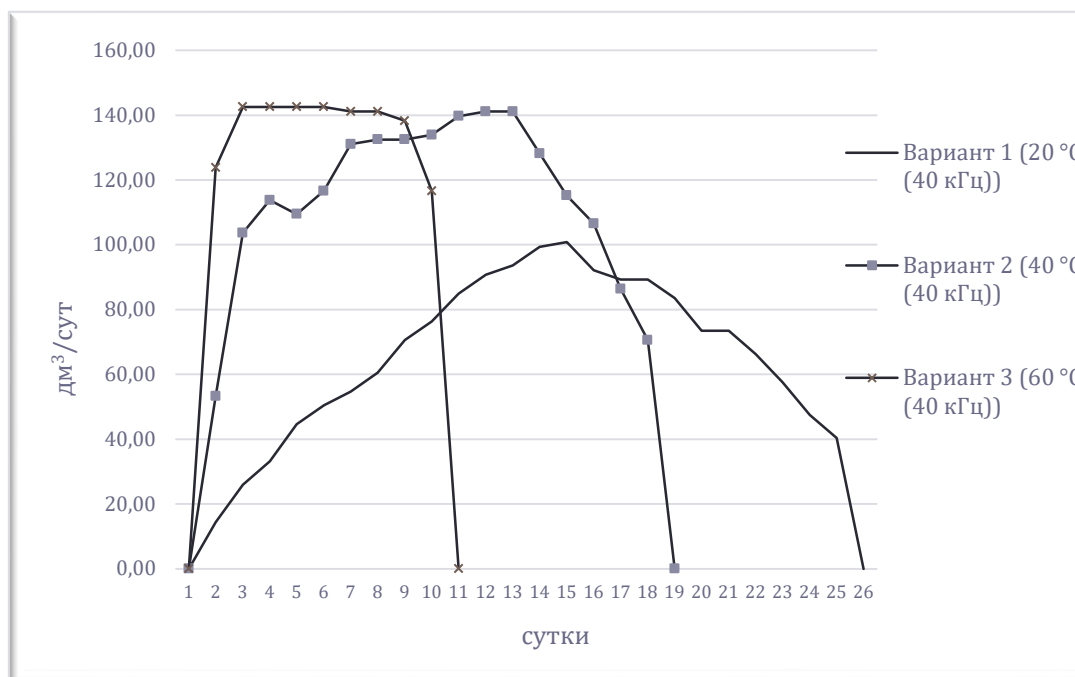


Рисунок 4 – Производство биогаза из пивной дробины при обработке ультразвуком 40 кГц
 Figure 4. Biogas production from brewer's spent grains under 40 kHz ultrasonic treatment

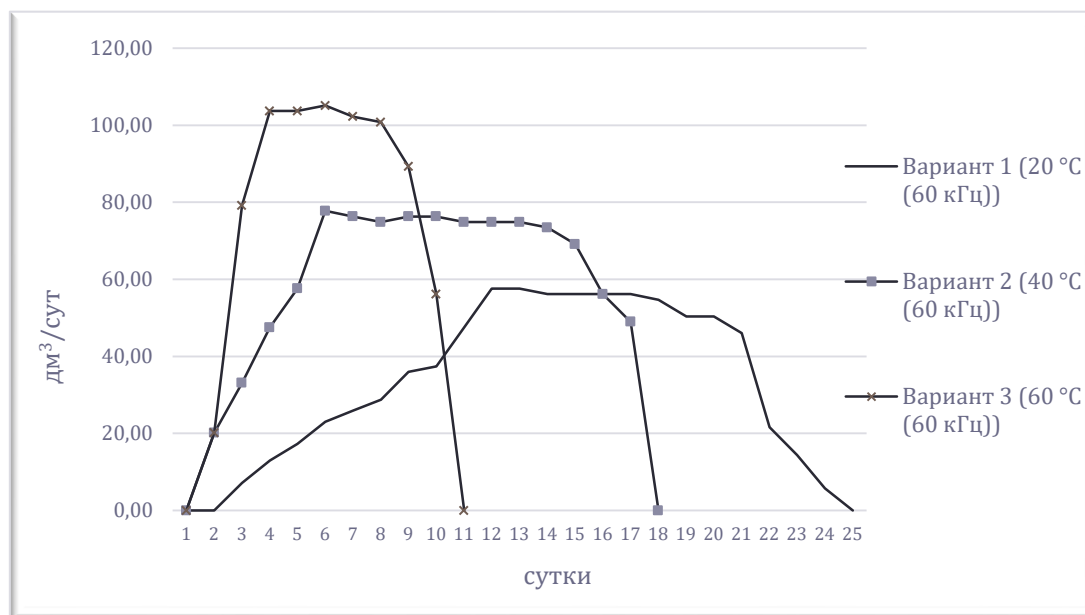


Рисунок 5 – Производство биогаза из пивной дробины при обработке ультразвуком 60 кГц
 Figure 5. Biogas production from brewer's spent grains under 60 kHz ultrasonic treatment

Анализируя данные экспериментов предыдущих этапов можно констатировать, что как температура, так и ультразвук оказывают влияние на объем производимого биогаза и на его качественные характеристики (содержание метана) [9; 10]. Однако, это влияние может быть как позитивным, так и отрицательными. На *третьем этапе* проведены отдельные эксперименты с изменением температуры и частоты ультразвука при обработке в точках, близких к центру полнофакторного плана.

В первую очередь проводились эксперименты при частоте ультразвуковой обработки 30 кГц (при температурах 20; 30; 40; 50 и 60°C) (рисунок 6).

Во вторую подгруппу вошли эксперименты со значением частоты обработки 50 кГц (при температурах 20; 30; 40; 50 и 60°C) (рисунок 7).

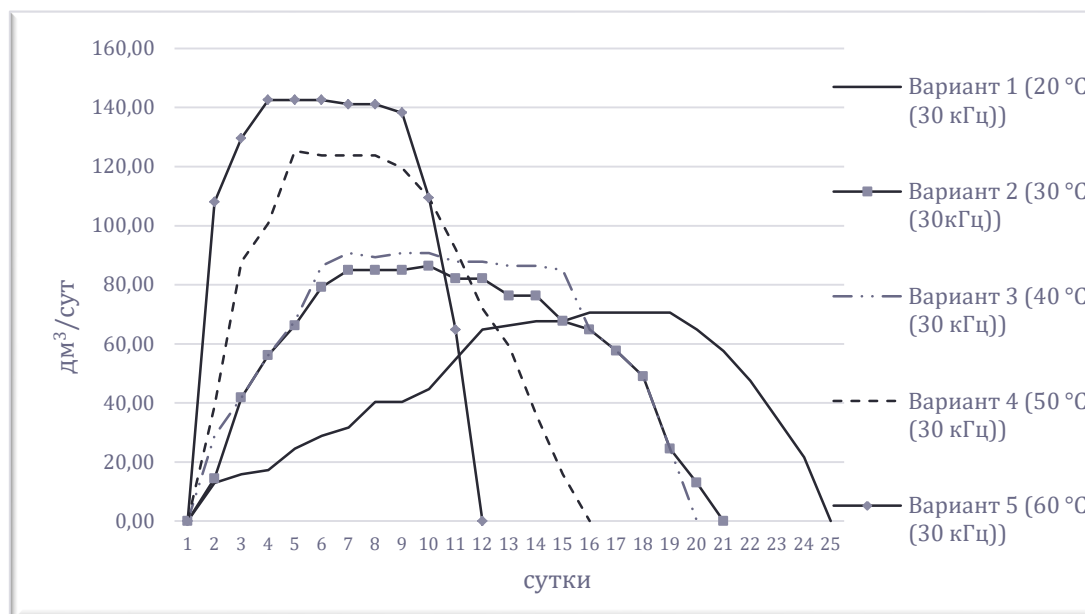


Рисунок 6 – Производство биогаза из пивной дробины при обработке ультразвуком 30 кГц
 Figure 6. Biogas production from brewer's spent grains under 30 kHz ultrasonic treatment

Из полученных в ходе эксперимента зависимостей (Вариант 1, рисунок 5) видно, что в сравнении с аналогичным экспериментом с обработкой субстрата частотой 20 кГц прирост объема полученного биогаза вырос незначительно, лишь на 4%. По сравнению с экспериментом, когда не было дополнительной акустической обработки, прирост составил 18%. Таким образом, интенсивная ультразвуковая обработка позитивно отразилась на синтезе биогаза. Содержание CH_4 в произведенном биогазе составило 68,5%, что соответствует предыдущим аналогичным экспериментам.

Из полученных в ходе эксперимента зависимостей (Вариант 2, рисунок 6) видно, что в сравнении с предыдущим экспериментом данной группы, суммарный прирост объема биогаза вырос на 10%. Качество биогаза осталось высоким при незначительном сокращении содержания CH_4 до 65%.

Из данных на рисунке 6 (Вариант 3) видно, что прирост биогаза увеличился на 19% в сравнении с экспериментом без воздействия ультразвука, а в сравнении с предыдущим экспериментом – на 3%. Содержание метана при этом достигло значения 62,5%, но это значение на 1,5% выше, чем в опыте без обработки ультразвуком.

Из полученных в ходе эксперимента зависимостей (Вариант 4, рисунок 6) видно, что в сравнении с предыдущим экспериментом при температуре 40°C, суммарный выход биогаза упал на 3%. Это подтверждает предположение о том, что при превышении температуры скорость синтеза замедляется. Среднее содержание метана в произведенном биогазе упало до 53%. Таким образом, увеличение температуры приводит к снижению калорийности синтезируемого биогаза.

Из полученных в ходе эксперимента зависимостей (Вариант 5, рисунок 6) видно, что увеличение температуры в биореакторе приводит к уменьшению выхода биогаза (падение составило 3%). Среднее содержание метана в произведенном биогазе значительно сократилось (до 39%).

Последняя серия экспериментов проводилась при частоте ультразвуковой обработки 50 кГц (рисунок 7).

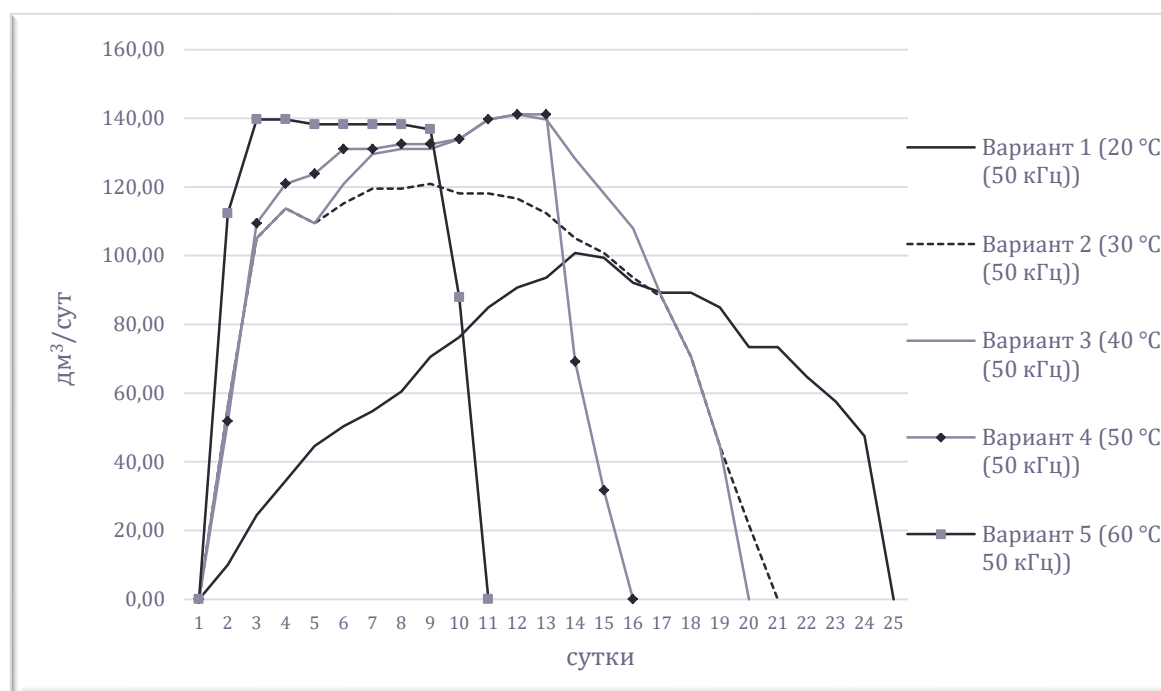


Рисунок 7 – Производство биогаза из пивной дробины при обработке ультразвуком 50 кГц
Figure 7. Biogas production from brewer's spent grains under 50 kHz ultrasonic treatment

Из полученных в ходе эксперимента зависимостей (Вариант 1, рисунок 7) следует, что в сравнении с аналогичным экспериментом без ультразвуковой обработки прирост биогаза вырос на 71%, но в сравнении с обработкой субстрата ультразвуком с частотой 40 кГц, прирост упал на 3%. Таким образом, повышение частоты акустического воздействия негативно отразилось на синтезе биогаза. Содержание метана в произведенном биогазе составило 69,5%, что соответствует предыдущим аналогичным экспериментам. Данный эксперимент подтверждает возможность ингибирующего

воздействия ультразвука на активность микроорганизмов.

Из полученных зависимостей (Вариант 2, рисунок 7) видно, что в сравнении с предыдущим экспериментом данной группы, суммарный прирост биогаза вырос на 18%. Подобная тенденция схожа с первой подгруппой третьей группы экспериментов. Качество биогаза по содержанию метана остается высоким (на уровне 68%).

Из полученных в ходе эксперимента зависимостей (Вариант 3, рисунок 7) видно, что прирост биогаза с применением ультразвука увеличился на 88% в сравнении с экспериментом без его воздействия, а в сравнении с предыдущим экспериментом возрос на 9%. Содержание метана достигает значения 65,5%.

Из полученных в ходе эксперимента зависимостей (Вариант 4, рисунок 7) видно, что в сравнении с предыдущим экспериментом при температуре 40°C, суммарный выход биогаза снизился на 21%, а среднее содержание метана упало до 60%.

Из полученных в ходе эксперимента зависимостей (Вариант 5, рисунок 7) видно, что увеличение температуры значительно снизило выход биогаза, падение составило 26%. Среднее содержание метана в произведенном биогазе составило 41,5%.

Результаты экспериментов позволяют перейти к постановке и решению задачи оптимального управления процессом выработки биогаза и полностью подтверждают намеченные ранее возможности интенсификации режима его выработки из пивной дробины путем сбраживания сырья при предварительной ультразвуковой обработке [11]. Результаты изучения режимов работы биореактора показывают, что использование ультразвуковой предварительной обработки в отношении пивоваренной дробины для производства биогаза позволяет решить проблемы не только эффективной утилизации пивоваренных отходов, но и создать экономически эффективный ресурс возобновляемой энергии на пивоваренном или аффилированном с ним производстве [12].

Обработка результатов и выводы

В настоящем исследовании решались задачи по определению возможностей создания эффективного технологически и экономически малозатратного способа переработки основного отхода пивоваренных производств – пивной дробины. Подобный способ решает проблему утилизации отходов при одновременном синтезе биогаза, что позволяет сделать основное производство переработки более энергонезависимым [13; 14].

Статистическую обработку данных осуществляли в программе MS Excel.

По имеющимся экспериментальным данным (объем выборки 365 единиц) была получена регрессионная модель зависимости величины выработки биогаза в сутки (Y , дм³) от трех факторов: X_1 – время проведения синтеза (сут.), X_2 – частота обработки (кГц), X_3 – температура процесса (°C)

$$Y = 1367400,31 - 310415,14 X_1 + 8825,99 X_1^2 + 331,09 X_2^2 + 4683,82 X_1 X_3.$$

При построении и оценке адекватности модели проводились:

- ✓ построение корреляционной матрицы для величин факторов и оценка значимости корреляции между ними;
- ✓ оценка параметров регрессионной модели по методу наименьших квадратов;
- ✓ проверка статистической значимости параметров модели на уровне 0,05 по критерию Стьюдента;
- ✓ проверка адекватности по критерию Фишера.

В ходе обработки результатов было выявлено наличие автокорреляции случайных отклонений модели на основе статистики Дарбина–Уотсона и критерия Бреуша–Годфри; гетероскедастичность случайных отклонений модели с помощью теста Уайта. Тест Уайта показал отсутствие явления гетероскедастичности, так как при уровне значимости коэффициентов 5%, Р-вероятность составила 0,52, что больше 0,05. Модель согласуется с моделью, полученной ранее [15].

На основании полученной модели установлено, что на выход биогаза оказывают влияние: значение температуры проведения реакции, частота ультразвука при обработке субстрата, а также совместное взаимодействие этих факторов. Максимальный выход биогаза наблюдается при граничном для данного режима значении температуры.

Основным результатом исследования, описанным в настоящей статье, является определение

и обоснование аналитически и математически эффективных и оптимальных режимов переработки пивной дробины с применением ультразвука, оказывающих определенное положительное влияние на увеличение выработки биогаза с максимальным содержанием метана:

Таблица 3. Оптимальные показатели переработки пивной дробины с предварительной обработкой ультразвуком

Table 3. Optimal characteristics of brewer's spent grains processing with ultrasonic pretreatment

Параметр	Показатель
температура ведения процесса, °С	40
частота УЗ обработки, кГц	50
продолжительность УЗ обработки, мин.	30
периодичность УЗ обработки, раз/сутки	2
продолжительность процесса переработки дробины в биогаз, дни	20

Полученные по результатам описанного в настоящей статье исследования данные дают достаточно серьезную перспективу практического применения технологии анаэробного сбраживания пивной дробины с обработкой ультразвуком. Применение комплексного термосоникационного метода переработки дробины фактически переводит ее из категории отхода производства в побочный продукт, который позволяет значительно улучшить энергетический баланс пивоваренного предприятия, в значительной степени заменив сторонние закупаемые источники энергоносителей и сократив расходы на утилизацию дробины.

Литература

1. Орси́к Л.С., Сорокин Н.Т., Федоренко В.Ф. Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития. М.: Росинформагротех, 2008. 403 с.
2. Тихонравов В.С. Ресурсосберегающие биотехнологии производства альтернативных видов топлива в животноводстве. М.: Росинформагротех, 2011. 52 с.
3. Добрынина О.М. Технологические аспекты получения биогаза // Вестник Пермского гос. техн. ун-та. 2010. № 2. С. 33–40.
4. Панцхава Е.С., Беренгартен М.Г., Вайнштейн С.И. Биогазовые технологии. Проблемы экологии, энергетики, сельскохозяйственного производства. М.: Экзорс, 2008. 217 с.
5. Бодрова О.Ю., Кречетникова А.Н. Активирующий и дезинтегрирующий эффекты ультразвуковой обработки микроорганизмов // История науки и техники. 2006. № 4. С. 51–54.
6. Сорока С.А. Влияние акустических колебаний на биологические объекты // Вибрация в технике и технологиях. 2005. № 1. С. 39–41.
7. Abbasi T.A., Tauseef S.M., Abbasi S.A. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, no. 16, pp. 228–242.
8. Albertson M.L., Pruden A.T., Oliver R.T. Enhanced anaerobic digestion of biomass waste for optimized production of renewable energy and solids for compost. *Int. Congr. Sci.* 2006, no. 93, pp. 221–229.
9. Barbanti L.N., Girolamo G.D., Grigatti M.N., Bertin L.C., Ciavatta C.R. Anaerobic digestion of annual and multi-annual biomass crops. *Ind. Crops Prod.* 2014, no. 56, p. 137–144.
10. Dahiya S., Joseph J. High rate biomethanation technology for solid waste management and rapid biogas production: An emphasis on reactor design parameters. *Bioresour. Technol.* 2015, no. 188, pp. 73–78.
11. Gu Y., Chen X., Liu Z., Zhou X., Zhang X. Effect of inoculum sources on the anaerobic digestion of rice straw. *Bioresour. Technol.* 2014, no. 158, pp. 149–155.
12. Kobayashi T., Tang Y., Urakami T., Morimura S., Kida K. Digestion performance and microbial community in full-scale methane fermentation of stillage from sweet potato-shochu production. *J. Environ. Sci.* 2014, no. 26, pp. 423–431.
13. Шевелуха В.С., Калашикова Е.А., Кочиева Е.З. Сельскохозяйственная биотехнология. М.: Высшая школа, 2008. 710 с.
14. Li W., Guo J., Cheng H., Wang W., Dong R. Two-phase anaerobic digestion of municipal solid wastes enhanced by hydrothermal pretreatment: Viability, performance and microbial community evaluation. *Appl. Energy.* 2017, no. 189, pp. 613–622.
15. Пушкарева А.Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани. СПб: Изд-во Ун-та ИТМО, 2008. 103 с.

Reference

1. Orsik L.S., Sorokin N.T., Fedorenko V.F. Bioenergy: world experience and development forecasts. Moscow, Rosinformagroteh Publ., 2008. 403 p. (*In Russian*)
2. Tikhonravov V.S. Resource-saving biotechnologies for the production of alternative fuels in animal husbandry: scientific. analyte. review. Moscow, Rosinformagroteh Publ., 2011. 52 p. (*In Russian*)
3. Dobrynina O.M. Technological aspects of biogas production. *Bulletin of Perm State Technical University*. 2010, no. 2, pp. 33–40 (*In Russian*)
4. Pantskhava E.S., Berengarten M.G., Vainshtein S.I. *Biogas technologies. Problems of ecology, energy, agricultural production*. Moscow, Ekoros Publ., 2008. 217 p. (*In Russian*)
5. Bodrova O.Yu., Krechetnikova A.N. Activating and disintegrating effects of ultrasonic treatment of microorganisms. *History of Science and Technology*. 2006, no. 4, pp. 51–54. (*In Russian*)
6. Soroka S.A. Influence of acoustic vibrations on biological objects. *Vibration in engineering and technology*. 2005, no. 1, pp. 39–41 (*In Russian*)
7. Abbasi T.A., Tauseef S.M., Abbasi S.A. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, no. 16, pp. 228–242.
8. Albertson M.L., Pruden A.T., Oliver R.T. Enhanced anaerobic digestion of biomass waste for optimized production of renewable energy and solids for compost. *Int. Congr. Sci.* 2006, no. 93, pp. 221–229.
9. Barbanti L.N., Girolamo G.D., Grigatti M.N., Bertin L.C., Ciavatta C.R. Anaerobic digestion of annual and multi-annual biomass crops. *Ind. Crops Prod.* 2014, no. 56, p. 137–144.
10. Dahiya S., Joseph J. High rate biomethanation technology for solid waste management and rapid biogas production: An emphasis on reactor design parameters. *Bioresour. Technol.* 2015, no. 188, pp. 73–78.
11. Gu Y., Chen X., Liu Z., Zhou X., Zhang X. Effect of inoculum sources on the anaerobic digestion of rice straw. *Bioresour. Technol.* 2014, no. 158, pp. 149–155.
12. Kobayashi T., Tang Y., Urakami T., Morimura S., Kida K. Digestion performance and microbial community in full-scale methane fermentation of stillage from sweet potato-shochu production. *J. Environ. Sci.* 2014, no. 26, pp. 423–431.
13. Shevelukha V.S., Kalashnikova E.A., Kochieva E.Z. *Agricultural biotechnology*. Moscow, Vysshaya shkola, 2008. 710 p. (*In Russian*)
14. Li W., Guo J., Cheng H., Wang W., Dong R. Two-phase anaerobic digestion of municipal solid wastes enhanced by hydrothermal pretreatment: Viability, performance and microbial community evaluation. *Appl. Energy*. 2017, no. 189, pp. 613–622.
15. Pushkareva A.E. *Methods of mathematical modeling in biotissue optics*. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2008. 103 p. (*In Russian*).

Информация об авторах

Владимир Владимирович Житков – аспирант кафедры прикладной механики и инжиниринга технических систем
Олег Леонидович Ахремчик – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами

Information about the authors

Vladimir V. Zhitkov, Postgraduate Student, Department of Applied Mechanics and Engineering Systems Engineering
Oleg L. Akhremchik, D. Sc., Professor of the Department of Automated Control Systems for Biotechnological Processes

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 22.06.2021
Одобрена после рецензирования 30.08.2021
Принята к публикации 31.08.2021

The article was submitted 22.06.2021
Approved after reviewing 30.08.2021
Accepted for publication 31.08.2021