

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

В. Н. Штепа, кандидат технических наук, доцент

А. В. Козырь, инженер

Полесский государственный университет, Республика Беларусь

А. А. Новосад, старший преподаватель

НТУ Украины "Киевский политехнический институт им. И. Сикорского"

Н. А. Заец, доктор технических наук, доцент

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

E-mail: shns1981@gmail.com

Аннотация. *Методика исследования анаэробного брожения сыворотки базировалась на том, что сообщество метанообразующих микроорганизмов состоит из трех видов бактерий, а эффективность биогазовых установок зависит от различных факторов, один из них – однородность и гомогенность массы, загружаемой в биореактор. При проверке влияния кавитационной УЗ обработки на молочную сыворотку были обоснованы и созданы лабораторные биогазовые установки, с помощью которых изучался эффект обработки на выделение биогаза и ускорение скорости его получения.*

*Методика исследований интенсификации роста микрорезени базировалась на том, что при обработке ультразвуком семена обеззараживаются, покрываются микротрещинками от 1 до 10 микрон, что ведет к увеличению поступления воды и воздуха к семенам, также ускоряется прорастание семян. Обработке подвергались семена рапса сорта «Гефест» в стеклянной колбе объемом 1000 мл, в качестве рабочей среды применялась вода из установки замкнутого водоснабжения, где выращивался Ленский осетр (*Acipenser baerii*).*

В обоих случаях в качестве источника ультразвука использовался электротехнический агрегат работающий на частоте 22 кГц (мощность – до 76 Вт).

Пробы микрорезени, которые обрабатывались ультразвуком, показали практические результат прироста до 78 % (мощность 42 Вт) от идеального, а при обработке с большей мощностью прирост достиг до 97 % (мощность 76 Вт). Анализ всхожести проб с одинаковой мощностью обработки, показал, что в пробах, в которых время обработки было больше, процент прорастания выше: на 5 % при обработке с мощностью 76 Вт, и на 3 % при обработке с мощностью 42 Вт.

Полученные результаты обосновали дальнейшие исследования в направлении построения систем адаптивного управления ультразвуковой интенсификацией биотехнологических процессов на основе искусственного интеллекта.

Ключевые слова: *интенсификация, биотехнологические системы, ультразвуковое воздействие, биогазовые процессы, микрозелень, продуктивность*

Актуальность. Интенсификация биохимических процессов, которые являются основными в биотехнологических системах, может быть достигнута в результате воздействия ряда внешних факторов [1]:

- повышения рабочих температур и давлений,
- устранения ограничений в передаче энергии от источника в химически реагирующую систему с использованием катализаторов,
- электромагнитным и газодинамическим перемешиванием веществ и других методов.

В газовой фазе могут быть осуществлены разнообразные атомно-молекулярные процессы в результате резонансного взаимодействия индивидуальных молекул с фотонами. Этот круг вопросов рассматривается в фото- и лазерохимии. Однако необходимо отметить ограниченность объема обрабатываемого вещества лазерным лучом.

Воздействие электрическим током в электрохимических производствах составляет основу электролитического производства многих биохимических продуктов. Действие же ионизирующих излучений приводит к многообразным биохимическим превращениям в газах, водных растворах неорганических и органических соединений, радиационным превращениям органических соединений и их смесей, интенсификации ряда технологических процессов.

При этом одним из наиболее перспективных направлений является воздействие мощными акустическими полями в режиме кавитации, когда происходят сложные био-физико-химические явления, в результате которых не только ускоряются отдельные биохимические реакции, но и реализовываются реакции, не идущие в других условиях.

Соответственно, актуальной задачей является обоснование ультразвуковых (УЗ) способов интенсификации протекания биохимических процессов в биотехнологических системах.

Анализ последних исследований и публикаций. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов – сложный физико-химический процесс, основанный на использовании ряда эффектов, возникающих в жидкой среде при введении в нее мощных ультразвуковых колебаний [1]. Первичными эффектами принято считать эффекты механической природы, такие как: кавитация, переменное звуковое давление, радиационное давление, акустические потоки и др. Наибольшее значение при удалении загрязнения с поверхности материала играет кавитация, сопровождающаяся захлопыванием кавитационных пузырьков и образованием интенсивных ударных (кумулятивных) воздействий. Захлопывание кавитационного пузырька приводит к генерации ударной волны, мгновенное значение давления в которой достигает нескольких тысяч атмосфер. Локальное давление такой силы сообщает значительные ускорения частицам, взвешенным в жидкости. При захлопывании пузырек может распадаться на большое количество мелких пузырьков, каждый из которых является зародышем для будущего кавитационного пузырька. Пульсирующие незахлопывающиеся пузырьки также оказывают разрушающее действие на поверхности раздела жидкости и твердого тела. Одним из основных факторов, влияющих на скорость растворения, является скорость диффузии [2]. Интенсивное перемешивание уменьшает толщину диффузионного слоя вблизи очищаемой поверхности, что увеличивает скорость очистки. Согласно опытным данным толщина диффузионного слоя обратно пропорциональна корню квадратному из относительной скорости движения фаз [3, 4]. Перемещение жидкости акустическими течениями по своему характеру принципиально отличается от любых видов механического перемешивания. Вихревые потоки, возникающие вблизи препятствий, разрушают ламинарный слой на границе жидкость – твердое тело, способствует снятию концентрационных и диффузионных ограничений. Акустические и гидродинамические потоки,

возникающие на границе жидкость–твердое тело, ускоряют процесс растворения пленок загрязнения и способствуют перемешиванию компонентов в жидкой среде с биологическими компонентами [5].

Цель исследования – обоснование режимов и параметров ультразвуковой интенсификации процессов в биотехнологических системах.

Материалы и методика исследования. В качестве исследуемых биотехнологических систем использовались процессы:

- брожения сыворотки в анаэробных условиях;
- выращивания микроводорослей (рапса) методом аквапоники.

Методика исследования анаэробного брожения сыворотки базировалась на том, что сообщество метанообразующих микроорганизмов состоит из трех видов бактерий: осуществляющих гидролиз и брожение (их деятельность расщепляет целлюлозу, синтезируют жирные кислоты); образующих водород и уксусную кислоту; водородотрофные метанообразующие бактерии.

Соответственно, биогаз – газ, состоящий примерно из 50-70 % метана (CH_4), 30-50 % углекислого газа (CO_2). Различные виды микроорганизмов метаболизируют углерод из органических субстратов в бескислородных условиях (анаэробно). Этот процесс, называемый гниением или бескислородным брожением, следует за цепью питания – в процессе брожения из биоотходов вырабатывается биогаз [6]. Эффективность биогазовых установок зависит от различных факторов, один из них – однородность и гомогенность массы загружаемой в биореактор. Чем меньше и однороднее фракция сырья, тем активнее идут процессы брожения.

Для проверки влияния кавитационной УЗ обработки на молочную сыворотку был проведен ряд экспериментов и собраны лабораторные биогазовые установки с помощью которых изучался эффект обработки на выделение биогаза и ускорение скорости его получения.

Время обработки для гомогенизации молочной сыворотки составило 60 с. В качестве биореакторов использовались пластиковые герметичные пищевые емкости объемом 20 литров. В одну из емкостей помещалась обработанная молочная

сыворотка, в другую для произведения контроля и сравнения необработанная. Реакторы были заполнены сывороткой на 1/3, в каждой емкости находилось по 14 литров сырья (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид лабораторной установки оценки анаэробного брожения

Методика исследований базировалась на том, что при обработке ультразвуком семена обеззараживаются, покрываются микротрещинками от 1 до 10 микрон, что ведет к увеличению поступления воды и воздуха к семенам, также ускоряется прорастание семян. В качестве источника ультразвука использовался электротехнический агрегат работающий на частоте 22 кГц (мощность – до 76 Вт), который был закреплен на лабораторном штативе, рабочая зона прибора была опущена в стеклянную колбу объемом 1000 мл. Обработке подвергались семена рапса сорта «Гефест». Обработка проводилась в стеклянной колбе объемом 1000 мл. В колбу помещалась вода из Установки замкнутого водоснабжения (УЗВ), в которой выращивался Ленский осетр (*Acipenser baerii*). Гидрохимические показатели воды:

1. Водородный показатель рН – 7,5 (для измерения использовался электронный рН метр АСО-01, с погрешностью 0,1 рН);
2. Общая минерализация (TDS) – 623 ppm (для измерения использовался кондуктометр ЕС-3, с погрешностью 3 ppm);
3. Концентрация растворенного аммиака/аммония $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ – 0,5 мг/л (для измерения использовались капельные тесты производства ТЕТРА, анализ выполнялся по методике производителя);

4. Температура воды – 21 °С (измерения проводились бесконтактным лазерным пирометром Хuelіee GM-320, с погрешностью 1 °С).

В колбу объемом 1000 мл помещалось 600 мл воды из УЗВ и 40 г семян рапса. Исследования проводились при различной мощности УЗ обработки и времени обработки. Проведенные комбинации мощности и времени УЗ обработки представлены в таблице 1.

После проведения обработки семена рапса с помощью сита были изъяты из колбы и помещены для дальнейшего проращивания на нетканый геотекстиль плотностью 150 г/м². Проращивание происходило в лабораторных затемненных условиях без применения искусственного освещения. Каждые 20 ч производился полив водой из УЗВ объемом 30 см³ на каждую пробу. Проращивание производилось 4 суток с момента обработки семян УЗ при средней температуре 24 °С и средней влажности 82 %.

1. Влияния УЗ на семена рапса при различных его мощностях и времени обработки

Код пробы эксперимента	Мощность обработки УЗ, Вт	Продолжительность обработки, с
0/1	контроль	контроль
2	76	120
3	76	60
4	42	120
5	42	60

Результаты исследований и их обсуждение. В период исследований наблюдалась значительная разница в температуре реакторов. Так, на 11 день эксперимента температура реакторов отличалась на 6 °С, при одинаковой температуре подогрева, что связано с процессами активного брожения в биореакторе с обработанным сырьем. На 18 день температура в реакторах стабилизировалась, и на 3 °С в обоих реакторах превышала задаваемую температуру обогрева. Далее, реактор с обработанным в кавитационном аппарате сырьем показал

температуру близкую к температуре нагрева, а реактор с контрольной пробой начал нагреваться, и его температура на 5 °С превышала температуру нагрева. На 26 день эксперимента температура двух реакторов стабилизировалась и составляла 32 °С, при температуре нагрева 30 °С (рис. 2).

Данные о колебании температуры и объемы выделяющихся побочных газов позволяют сделать выводы, что процессы брожения в реакторе с обработанным сырьем протекают быстрее, чем в реакторе с контрольным сырьем. На 42 день эксперимента к емкости реактора с обработанным сырьем был подключен газгольдер, так как наблюдается активный выход метана. В контрольном реакторе выделение газов практически нет, и они не горючи.



Рис. 2. Изменение температуры биореакторов

К важнейшим положительным результатам предварительной обработки биологического сырья перед его направлением в биореактор можно отнести следующие показатели:

1. Высокая степень измельчения и гомогенизации сырья, как следствие, увеличение количества частиц на поверхности позволяет увеличить и интенсифицировать производство биогаза на 25 – 40 %.

2. Благодаря высокой дисперсности и интенсификации процессов анаэробного брожения, значительно уменьшается период сбраживания биомассы. Это показали

исследования температурных процессов и процессов газовой выделения в емкостях-реакторах

3. При деструкции биомассы из клеточных и субклеточных материалов интенсивнее высвобождаются природные энзимы, которые являются биологическими катализаторами процесса сбраживания биомассы. Этот эффект также увеличивает объём производимого биогаза [7].

Анализ всхожести производился ежедневно. На первые сутки эксперимента всхожих семян не наблюдалось. Результаты анализа всхожести семян рапса представлены в таблице 2.

2. Результаты всхожести семян рапса при различной мощности и времени УЗ обработки

Код пробы эксперимента	День 1, процент всхожести	День 2, процент всхожести	День 3, процент всхожести	День 4, процент всхожести
0/1	—	менее 2	15	21
2	—	16	87	97
3	—	6	79	92
4	—	3	35	78
5	—	менее 2	24	75

На рисунке ниже представлены фото лотков в которых происходило проращивание семян (рис. 3).



2 день експеримента



3 день експеримента



4 день експеримента

Рис. 3. Внешний вид проб исследования прорастания семян после ультразвукового воздействия

Проведя анализ полученных результатов можно сделать вывод, что УЗ обработка при высокой мощности и с длительной обработкой (проба №2) позволяет существенно интенсифицировать прорастание семян. На графике ниже представлена динамика прорастания семян по дням (рис. 4).

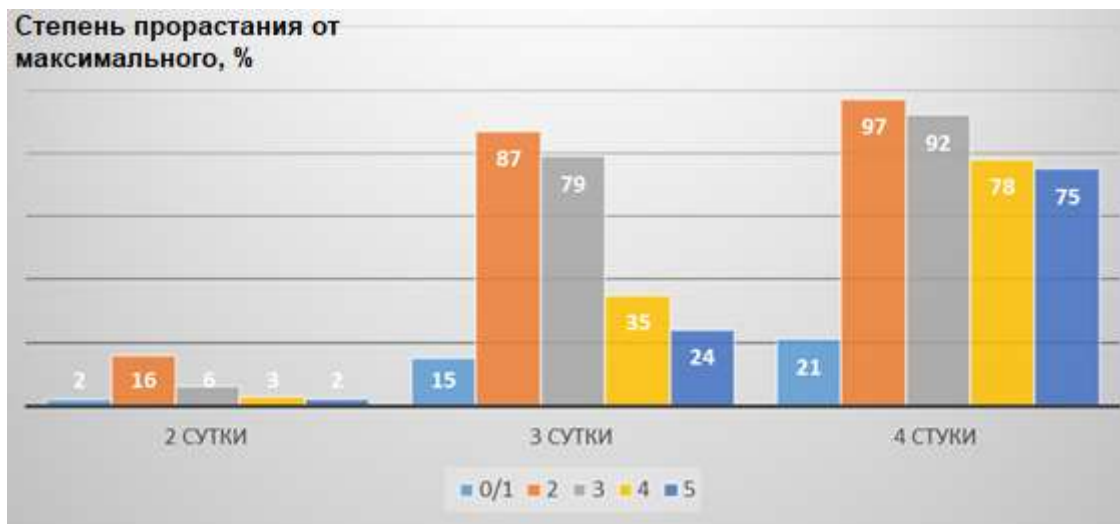


Рис. 4. Изменение динамики прорастания рапса после ультразвуковой обработки

Пробы, которые также обрабатывались ультразвуком, но с меньшей мощностью (№ 4 и №5) показали практически равный результат 78 и 75 %, так же как и пробы с обработкой с высокой мощностью (№ 2 и 3) 92 – 97 %. Так же, если проанализировать процент всхожести проб с одинаковой мощностью обработки, то в пробах, в которых время обработки было больше увеличился процент прорастания: на 5 % при обработке с мощностью 76 Ватт, и на 3 % при обработке с мощностью 42 Ватт. Самый низкий показатель – 21 % показала контрольная проба (0/1).

Выводы и перспективы. При ультразвуковой обработке биомассы существенно стабилизировались биологические процессы, что привело к отсутствию пенообразования и плавающей корки в верхней части биореактора. Таким образом, использованный принцип перемешивание сырья позволил обеспечить однородность раствора при увеличении содержание метана в биогазе до 70 – 75 %.

Также ультразвуковая обработка позволяет существенно повысить процент всхожести семян рапса при выращивании микрозелени методом аквапоники. По сравнению с контрольной группой процент всхожести увеличился на 76 % при УЗ-воздействии мощностью 76 Вт на протяжении 2 мин. При различных мощностях обработки (42 Вт или 76 Вт) лучшее прорастание наблюдается при более мощной обработке.

Дальнейшие исследования планируются проводить в направлении интенсификации процессов в биотехнологических системах под действием ультразвуковых полей путём построения соответствующих блоков адаптивного управления на основе систем искусственного интеллекта.

Список использованных источников

1. Сажин Б. С., Реутский В. А., Кошелева М. К. Пути повышения эффективности процесса промывки текстильных материалов. Москва: Легкая промышленность и бытовое обслуживание, 1988. 236 с.
2. Абрамов В. О., Абрамов О. В. и др. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. Москва: Янус, 2006. 688 с.
3. Приходько В. М., Калачев Ю. Н. Повышение эффективности технологических процессов ультразвуковой очистки. Издание Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 1995. № 2. С. 54-66.
4. Фаерман В. Т. Применение ультразвука для обработки текстильных материалов. Москва: Легкая индустрия, 1969. 436 с.
5. Hermans I.I. Colloid partieleles in ultrasonics fild. Über den Einflub der Ultrashallwellen auf chemischen Prozesse. Zs. phys. Chem., 1938. 257 p.
6. Заєць Н. А., Штепа В. М. Систематизація електротехнологічних комплексів водоочищення харчових виробництв. Енергетика і автоматика. 2018. № 4. С. 49–62.
7. Заєць Н. А., Штепа В. М. Використання когнітивного моделювання при управлінні біотехнологічними об'єктами харчових виробництв. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України: збірник наукових праць. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2018. Вип. 283. С. 29–38.

References

1. Sazhin B. S., Reutsky V. A., Kosheleva M. K. (1988). Puti povysheniya effektivnosti protsesssa promyvki tekstil'nykh materialov [Ways to improve the efficiency of the textile washing process]. Moscow: Legkaya promyshlennost' i bytovoye obsluzhivaniye, 236.

2. Abramov V. O., Abramov O. V. and others. (2006). Moshchnyy ul'trazvuk v metallurgii i mashinostroyenii [Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering]. Moscow: Yanus, 688.

3. Prikhodko V. M., Kalachev Yu. N. (1995). Povysheniye effektivnosti tekhnologicheskikh protsessov ul'trazvukovoy ochistki [Improving the efficiency of technological processes of ultrasonic cleaning]. Published by the Moscow Automobile and Highway State Technical University, 2, 54-66.

4. Faerman V.T. (1969). Primeneniye ul'trazvuka dlya obrabotki tekstil'nykh materialov [The use of ultrasound for the processing of textile materials]. Moscow. Legkaya industriya, 436.

5. Hermans I. I. (1938). Colloid partieles in ultrasonics fild. Über den Einflub der Ultrashallwellen auf chemischen Prozesse. Zs. phys. Chem., 257.

6. Zaiets N. A., Shtepa V. M. (2018). Systematyzatsiya elektrotekhnolohichnykh kompleksiv vodoochyshchennya kharchovykh vyrobnytstv [Systematization of electrotechnological complexes of water treatment of food industries]. Energy and automation, 4, 49–62.

7. Zaiets N. A., Shtepa V. M. (2018). Vykorystannya kohnityvnoho modelyuvannya pry upravlinni biotekhnolohichnyimi ob"yektamy kharchovykh vyrobnytstv [The use of cognitive modeling in the management of biotechnological objects of food production]. Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine: a collection of scientific papers. Series: Engineering and energy of agro-industrial complex, 283, 29–38.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ВПЛИВІ

В. М. Штепа, А. В. Козир, А. А. Новосад, Н. А. Заець

Анотація. *Методика дослідження анаеробного бродіння сироватки базувалася на тому, що колонія метаноутворюючих мікроорганізмів складається з трьох видів бактерій, а ефективність біогазових установок залежить від різних чинників, один з них - однорідність і гомогенність маси, що завантажуються в біореактор. При перевірці впливу кавітації УЗ обробки на молочну сироватку були обґрунтовані і створені лабораторні біогазові установки, за допомогою яких вивчався ефект обробки на виділення біогазу та прискорення швидкості його отримання.*

*Методика досліджень інтенсифікації зростання мікрозелені базувалася на тому, що при обробці ультразвуком насіння знезаражується, покривається мікротріщинами від 1 до 10 мікрон, що веде до збільшення надходження води і повітря до насіння, також прискорюється проростання насіння. Обробці піддавалися насіння ріпаку сорту «Гефест» в скляній колбі об'ємом 1000 мл. В якості робочого середовища застосовувалася вода з установки замкнутого водопостачання, де вирощувався Ленський осетер (*Acipenser baerii*).*

В обох випадках в якості джерела ультразвуку використовувався електротехнічний агрегат працює на частоті 22 кГц (потужність - до 76 Вт).

Проби мікрозелені, які оброблялися ультразвуком, показали практичні результати проросту до 78 % (потужність 42 Вт) від ідеального, а при обробці з

більшою потужністю приріст досяг до 97 % (потужність 76 Вт). Аналіз схожості проб з однаковою потужністю обробки показав, що в пробах, в яких час обробки був більшим, відсоток проростання вище: на 5 % при обробці з потужністю 76 Вт, і на 3 % при обробці з потужністю 42 Вт.

Отримані результати довели подальші дослідження в напрямку побудови систем адаптивного керування ультразвуковою інтенсифікацією біотехнологічних процесів на основі штучного інтелекту.

Ключові слова: інтенсифікація, біотехнологічні системи, ультразвукова дія, біогазові процеси, мікрозелень, продуктивність

INTENSIFICATION OF PROCESSES OF BIOTECHNOLOGICAL SYSTEMS UNDER ULTRASONIC IMPACT

V. Shtepa, A. Kozir, A. Novosad, N. Zaiets

Abstract. *The research methodology for anaerobic whey fermentation was based on the fact that the community of methane-forming microorganisms consists of three types of bacteria, and the efficiency of biogas plants depends on various factors, one of which is the uniformity and homogeneity of the mass loaded into the bioreactor. When checking the effect of cavitation ultrasonic treatment on milk whey, laboratory biogas plants were justified and created, with the help of which the effect of treatment on the release of biogas and the acceleration of the rate of its production was studied.*

*The research methodology for intensifying the growth of microgreens was based on the fact that when treated with ultrasound, seeds are disinfected, covered with microcracks from 1 to 10 microns, which leads to an increase in the flow of water and air to the seeds, and seed germination is also accelerated. The seeds of rape variety "Hephaestus" were treated in a glass flask with a volume of 1000 ml. Water from a closed water supply unit, where the Lena sturgeon (*Acipenser baerii*) was grown, was used as a working medium.*

In both cases, an electrical unit operating at a frequency of 22 kHz (power up to 76 W) was used as a source of ultrasound.

Microgreen samples, which were treated with ultrasound, showed a practical result of an increase of up to 78 % (power 42 W) from ideal, and when processing with a higher power, the increase reached 97% (power 76 W). An analysis of the germination rate of samples with the same processing power showed that in samples in which the processing time was longer, the percentage of germination was higher: by 5 % when processing with a power of 76 W, and by 3 % when processing with a power of 42 W.

The results obtained substantiated further research in the direction of constructing adaptive control systems for ultrasonic intensification of biotechnological processes based on artificial intelligence.

Key words: *intensification, biotechnological systems, ultrasonic exposure, biogas processes, microgreens, productivity*