

УДК 622.75

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФЕРМЕНТАТИВНОГО ПОЛУЧЕНИЯ ЭТАНОЛА МЕТОДАМИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

С.Е. Щеклеин, А.Г. Шастин, С.А. Коржавин

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

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния температурных условий, регенерации бактериальной массы и концентрации сахаров на продолжительность и энергетические затраты стадии спиртового брожения в процессах получения топливного этанола, а также влияние внешних физических воздействий на процесс сбраживания с целью его интенсификации.

Ключевые слова: производство биоэтанола, температурные условия, ультразвуковое воздействие, концентрация сахара, энергетическая эффективность.

INTENSIFICATION OF ENZYMATIC ETHANOL GENERATION PROCESSES BY METHODS OF ULTRASONIC ACTION

S.E. Shcheklein, A.G. Shastin, S.A. Korzhavin

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

In this paper there are presented the results of the experimental investigation of the influence of the thermal conditions, bacterial mass regeneration and sugar concentration on the duration and energy consumption of the alcoholic fermentation stage in the processes of the fuel ethanol production and the influence of the external physical actions on the intensification of the fermentation process.

Keywords: production of ethanol, temperature conditions, ultrasonic action, concentration of sugar, energy efficiency.

Введение

Производство биотоплива в странах мира (главным образом этанола) по оценкам [1] превысит 6,5 млн барр./сут. к 2030 г. по сравнению с уровнем в 1,8 млн барр./сут. в 2010 г., обеспечивая 30% глобального роста предложения в течение следующих 20 лет и весь чистый рост за пределами ОПЕК. Сохраняющаяся политическая поддержка, высокие цены на нефть в последние годы, а также технологические нововведения вносят вклад в быстрое расширение

его производства. В производстве биотоплива по-прежнему будут доминировать США и Бразилия; в совокупности они обеспечат 68% общего производства в 2030 году (по сравнению с 76% в 2010 г.). Ожидается, что львиную долю роста обеспечит биотопливо первого поколения. После 2020 г. примерно 40% глобального роста спроса на жидкое топливо будет удовлетворять биотопливо (по сравнению с 13% в 2010 г.), причем в росте потребления будут лидировать США и Европа (рис. 1). К 2030 г. этот уровень приблизится к 60%.

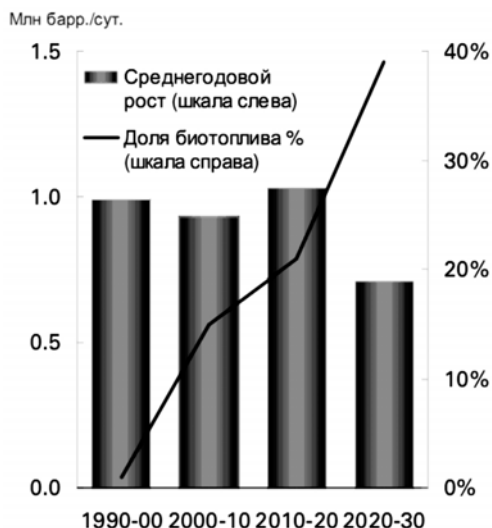


Рис. 1. Рост потребления и доля биотоплива в мире
Fig. 1. The growth of the consumption and the biofuels share in the world

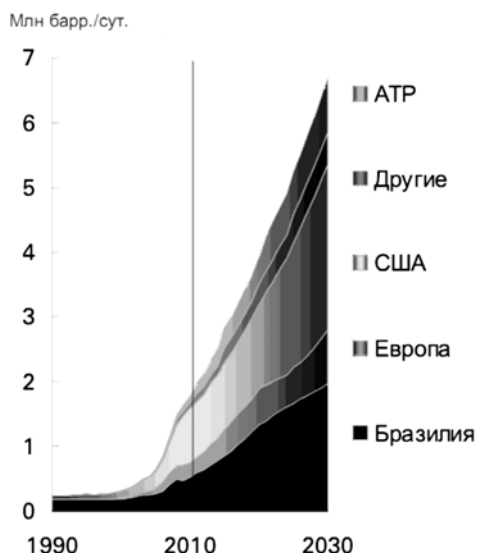


Рис. 2. Предложение и прогноз производства этанола в мире
Fig. 2. The proposal and the forecast of the ethanol production in the world

Фундаментальной проблемой получения биотоплива является высокая энергоёмкость процесса на стадиях подготовки и осахаривания сырья (биомассы); наиболее распространённой технологии термической ректификации, в ряде случаев превышающая энергетическую эффективность этанола. Приведённые на рис. 2 данные указывают на то, что лидерами по производству биотоплива являются и будут оставаться страны с благоприятными природно-климатическими условиями для выращивания культур с высоким содержанием сахара, высокой урожайностью, низкими энергозатратами на единицу продукции, большой длительностью периодов эффективного сельскохозяйственного производства, а также низ-

кими затратами энергии для поддержания необходимых тепловых режимов на всех стадиях переработки сырья в биотопливо.

Большинство регионов РФ не имеет конкурентных климатических условий для развития традиционных технологий производства биотоплива. Однако большие размеры территории, благоприятная обеспеченность водными ресурсами, наличие опыта крупномасштабного производства этанола из разных видов биологического сырья создают предпосылки для поиска новых технологических решений по производству этанола (и других видов биотоплив) и в нашей стране.

Биохимические и физические закономерности производства этанола, влияние на эффективность и энергоёмкость стадий процесса отдельных факторов детально рассматривалось в специальной литературе [2-8].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния температурных условий, регенерации бактериальной массы и концентрации сахаров на продолжительность и энергетические затраты стадии спиртового брожения в процессах получения топливного этанола, а также влияние внешних физических воздействий на процесс сбраживания с целью его интенсификации.

Экспериментальный стенд и методы исследования

Стенд разрабатывался с целью исследования процессов получения этанола из биомасс различного типа, интенсификации и повышения энергоэффективности процесса получения этанола. В состав стенда входят: бродильные емкости, ультразвуковое оборудование для ускорения процессов брожения, установка для ректификации, контрольно-измерительные приборы и оборудование. Принципиальная схема работы стенда приведена на рис. 3.

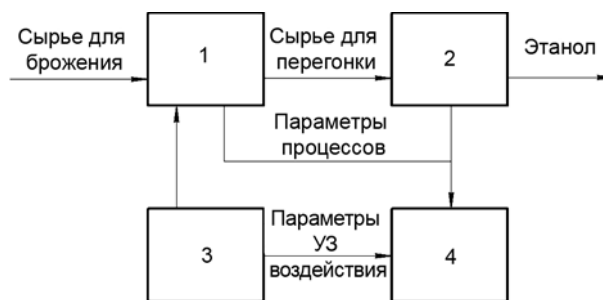


Рис. 3. Схема стенда получения этанола: 1 – бродильные емкости; 2 – установка ректификации; 3 – ультразвуковое оборудование; 4 – контрольно-измерительные приборы
Fig. 3. The ethanol production test bench scheme: 1 – fermentation tanks; 2 – distillation unit; 3 – ultrasonic equipment; 4 – instrumentation

Бродильные емкости представляют собой баки различного объема с устройством для выхода газа и гидрозатвором для обеспечения анаэробного сбраживания.

Общий вид стенда для исследования процессов скорости реакции анаэробного спиртового сбраживания приведен на рис. 4.

Бродильная емкость представляет собой герметичный сосуд объемом 3 л, оборудованный каналом выхода газа и зондом для измерения температуры субстрата. Бродильная емкость погружена в термостат для поддержания оптимальных температурных условий анаэробного спиртового брожения. Канал выхода газа из бродильной емкости подведен к расходомеру ГСБ-400, оборудованному гидрозатвором для обеспечения анаэробного спиртового брожения.



Газовый счетчик
Мультиметр с термозондом
Термостат
Бродильная емкость

Рис. 4. Стенд исследования процессов анаэробного сбраживания
Fig. 4. The anaerobic fermentation processes investigation test bench

В опытах использовался субстрат оптимального состава: сусло с содержанием сахара от 5 до 20% дрожжевого затора и питательные вещества для питания дрожжей. В ходе экспериментов исследовались параметры, по которым можно оценивать скорость процесса. Таким параметром является содержание сахара в субстрате, но для его измерения приходится нарушать герметичность установки сбраживания, после чего субстрату необходимо некоторое время, чтобы выйти на режим анаэробного сбраживания. По результатам экспериментов была выявлена линейная зависимость содержания сахара в субстрате от количества газа, вышедшего в результате брожения. Данная зависимость оказалась одинаковой при различных физических воздействиях на субстрат в ходе брожения: температура процесса сбраживания, ультразвуковое и вибрационное воздействие на субстрат. Поэтому можно считать количество вышедшего газа прямым показателем скорости протекания процесса анаэробного сбраживания. График зависимости количества вышедшего из субстрата газа от количества израсходованного в ходе реакции сахара в относительных величинах изображен на рис. 5.

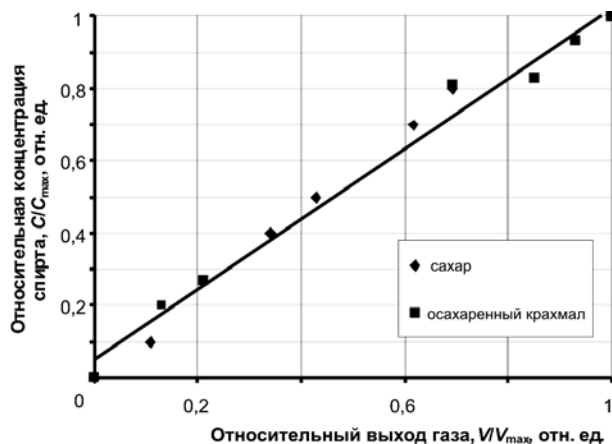


Рис. 5. Зависимость относительного выхода газа от относительного расхода сахара
Fig. 5. The dependence of the relative gas output on the relative sugar consumption

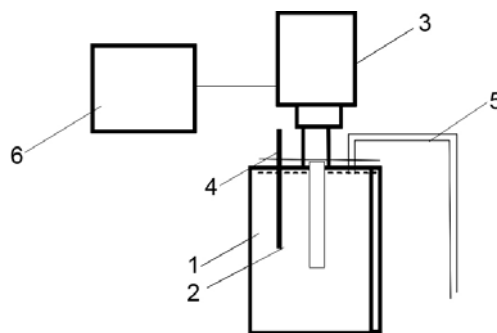
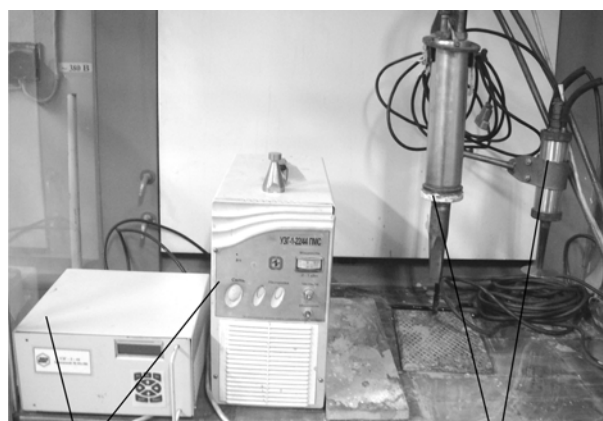


Рис. 6. Схема экспериментальной установки:
1 – емкость; 2 – сахаросодержащий субстрат;
3 – магнитострикционный преобразователь; 4 – спиртомер;
5 – штуцер отвода газа на счетчик количества
Fig. 6. The experimental installation scheme:
1 – tank; 2 – sugar containing substrate; 3 – magnetostriction transducer; 4 – alcoholometer; 5 – discharge gas nipple to the counter of quantity



Генераторы ультразвука
Магнитострикционные излучатели ультразвука

Рис. 7. Ультразвуковое оборудование
Fig. 7. The ultrasonic equipment

Для исследования влияния ультразвука на процесс брожения разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 6.

Для создания ультразвуковых полей регулируемой интенсивности использовались генераторы ультразвука с магнестрикционными преобразователями мощностью 0,3 и 1 кВт. Частота ультразвуковых колебаний составляла 44 кГц. Общий вид ультразвукового оборудования приведен на рис. 7.

Исследование влияния технологических факторов на эффективность процесса брожения

На рис. 8-11 приведены результаты исследования влияния температуры процесса, регенерации бактериальной массы и начальной концентрации сахаров в субстрате на продолжительность полного сбраживания и перехода сахаров в спирт.

Приведенные данные позволяют выявить диапазоны технологических параметров, обеспечивающие наибольшую энергетическую эффективность процесса спиртового брожения и не противоречат результатам других авторов по исследованию влияния отдельных технологических факторов.

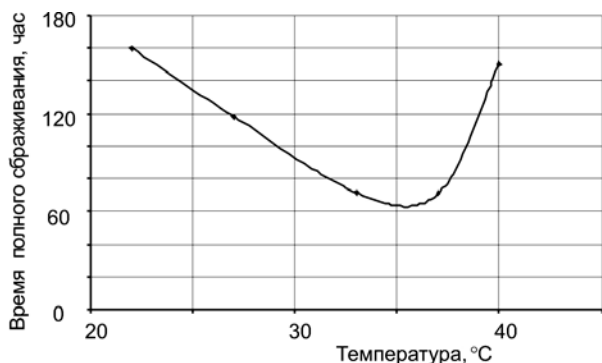


Рис. 8. Зависимость времени сбраживания от температуры процесса

Fig. 8. The dependence of the fermentation time on the process temperature

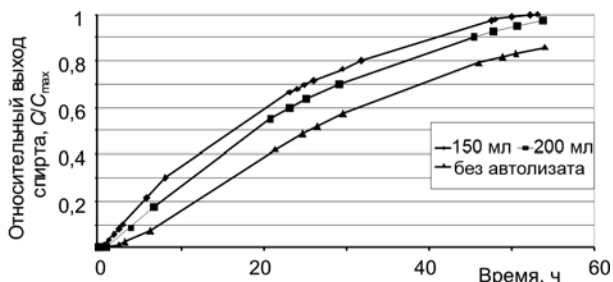


Рис. 9. Изменение относительной концентрации спирта с регенерацией бактериального материала

Fig. 9. The change of the relative concentration of alcohol with the regeneration of bacterial material

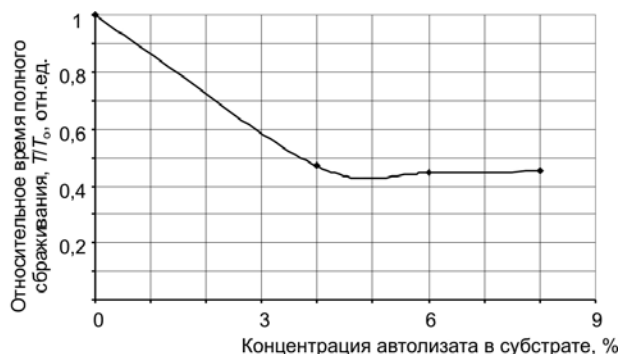


Рис. 10. Зависимость относительного времени полного сбраживания от величины регенерации бактериального материала

Fig. 10. The dependence of the time of full fermentation on the bacterial material regeneration value

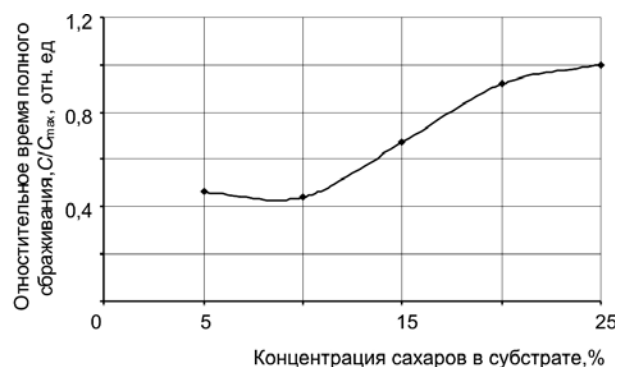


Рис. 11. Зависимость времени полного сбраживания от концентрации сахаров в субстрате

Fig. 11. The dependence of the total fermentation time on the sugar concentration in the substrate

Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы:

а) недогрев либо перегрев субстрата относительно оптимальной температуры (37 °C) приводит к снижению эффективности процесса, что свойственно для активности бактериальных культур анаэробного класса;

б) повышение концентрации автолизата значительно повышает эффективность процесса брожения при концентрациях до 4-5%, далее изменения незначительны;

в) повышение концентрации сахаров в субстрате выше оптимального уровня (8-9%) приводит к снижению эффективности процесса сбраживания.

Исследование влияния ультразвука на эффективность процесса брожения

В процессе исследования измерялся объем и скорость выделения газовой фазы, контролировались концентрации сахара и спирта в процессе анаэробного спиртового брожения в многодневном цикле.

Интенсивность ультразвукового поля, создаваемого магнестрикционными излучателями в объеме бродильной камеры, являлась относительно малой и

не превышала во всех опытах 100 Вт/л. Предварительные эксперименты показали, что при больших (свыше 1000 Вт/л) удельных мощностях ультразвукового поля брожение полностью прекращалось в связи с бактерицидным действием поля.

В то же время малые удельные мощности существенно интенсифицировали процесс брожения, что связано, по-видимому, с некоторой интенсификацией кинетических и массообменных процессов в бродильной камере, в частности, ускорением выхода газовых субстанций и увеличением общей поверхности биохимического взаимодействия сахаров с анаэробными бактериями. На рис. 12 приведена типичная зависимость изменения во времени концентрации сахаров в субстрате от времени процесса при двух режимах ультразвукового воздействия.

На графике приведены данные контрольных опытов (без ультразвукового поля), опытов с постоянным наложением ультразвука и опытов с периодическим наложением пакетов ультразвука (со скважностью 4).

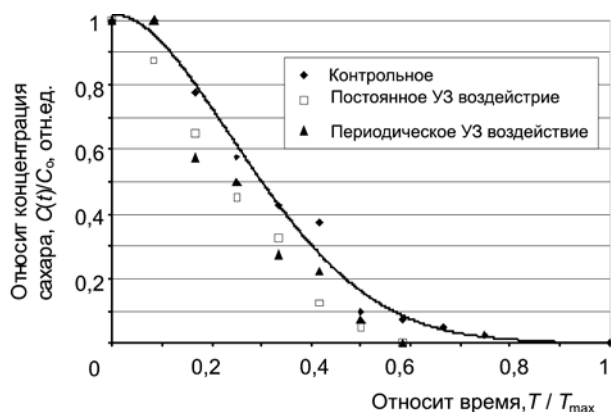


Рис. 12. График изменения концентрации сахаров от относительного времени воздействия ультразвукового поля
Fig. 12. Sugar concentration curve on the ultrasonic field relative exposure time

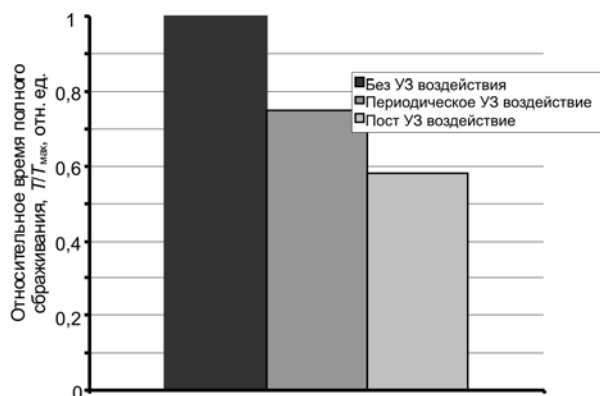


Рис. 13. Изменение продолжительности процесса сбраживания сахаров при ультразвуковом воздействии
Fig. 13. The change of the sugar fermentation process duration by the ultrasonic action

Обработка результатов для определения времени полного сбраживания (перехода сахаров в спирты) позволила получить график, приведенный на рис. 13.

Из приведенного графика видно, что применение ультразвукового поля существенно снижает время сбраживания и повышает энергетическую эффективность процесса, т.к. сокращает период необходимого подвода тепловой энергии для обеспечения благоприятных условий анаэробного брожения. Выполненные оценки показывают, что при снижении расхода тепловой энергии на 40% дополнительный расход электрической энергии на создание слабого ультразвукового поля не превышает 5-10%. Дальнейшая оптимизация систем ввода ультразвука, повышение КПД генераторов и преобразователей могут позволить дальнейшее снижение энергоемкости процесса.

Следует отметить, что процессы сбраживания не являются наиболее энергоемкими в технологиях получения этанола. Наиболее энергоемкие процессы – дистилляция, ректификация и дегидратация – также нуждаются в разработке методов радикального снижения энергоемкости.

Список литературы

1. Статистический обзор мировой энергетики компании «BP», Лондон, Великобритания, июнь 2010 г.
2. Биомасса как источник энергии / Под ред. С.Сауфера, О.Заборски. М.: Мир, 1985.
3. Терентьев Г.А., Тюков В.М., Смаль Ф.В. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. М.: Химия, 1989.
4. Стабников В.Н. Переработка и ректификация этилового спирта. М.: Пищевая промышленность, 1969.
5. Березин И.В., Клесов А.А., Швядас В.К. и др. Инженерная энзимология. М.: Высшая школа, 1987.
6. Березин И.В., Клячко Н.Л., Левашев А.В. и др. Имобилизованные ферменты. М.: Высшая школа, 1987.
7. Попова Д.В., Шастин А.Г., Щеклеин С.Е. Дробление пигментов краски с помощью ультразвука. Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых. 11-14 ноября 2008 г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008.
8. Щеклеин С.Е., Немихин Ю.Е., Борисова Е.В. Использование ядерной энергии для производства топливного этанола // Безопасность критических инфраструктур и территорий: Тезисы докладов II Всероссийской конференции и XII Школы молодых ученых. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. С. 254-255.