УДК 661.722:657.471

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА БИОЭТАНОЛА ИЗ ПЛОДОВЫХ ОБОЛОЧЕК ОВСА

Байбакова О.В.

ФГБУН «Институт проблем химико-энергетических технологий» Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск, e-mail: olka_baibakova@mail.ru

Актуальным направлением биоэнергетики является производство биоэтанола второго поколения из целлюлозосодержащего сырья. В данной работе приводится технико-экономическое обоснование производства биоэтанола из плодовых оболочек овса. Технология производства включает в себя обработку сырья в одну стадию раствором гидроксида натрия, ферментативный гидролиз, совмещенный со спиртовым брожением, дистилляцию и ректификацию биоэтанола. Рассчитана себестоимость биоэтанола для ЗАО «Бийский спиртзавод». Данный завод будет перерабатывать 64 000 т плодовых оболочек овса в год, что соответствует 1/5 запасов Алтайского края. С учетом производительности завода 768 000 дал биоэтанола в год и продажи попутной продукции себестоимость 1 дал биоэтанола составит 372,6 руб., или 37,26 руб. за 1 л биоэтанола, или 0,59 $. Себестоимость биоэтанола в данном проекте сопоставима с его себестоимостью в большинстве стран, таким образом, разработанная технология позволит получать конкурентоспособный продукт в условиях мирового рынка.

Ключевые слова: биоэтанол, плодовые оболочки овса, производство, себестоимость

TECHNICAL-ECONOMIC JUSTIFICATION OF BIOETHANOL PRODUCTION FROM OAT HULLS

Baybakova O.V.

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, e-mail: olka_baibakova@mail.ru

A steady trend is now being observed in the production of second-generation bioethanol from lignocellulosics. The present paper reports a technical-economic justification of bioethanol production from oat hulls. Technological operations in the bioethanol production include one-stage chemical pretreatment of feedstock with sodium hydroxide solution, enzymatic hydrolysis combined with alcoholic fermentation, distillation, and rectification of bioethanol. In this endeavor, the prime cost of bioethanol was estimated for ZAO Biyskiy Spirtzavod (Biysk Distillery). The distillery is expected to be processing 64,000 tons of oat hulls per annum, which is equivalent to 1/5 of the Altai Krai reserves. The production capacity of the distillery is 768,000 dal of bioethanol per year, and having regard to selling coproducts, the prime cost of 1 dal bioethanol will account for 372.6 rubles or 37.26 rubles per 1 L bioethanol, or 0.59 $. In this project, the estimated cost of bioethanol is commensurable with its prime cost in most countries worldwide, which will permit a competitive product to be produced under the global market conditions.

Keywords: bioethanol, oat hulls, production, prime cost

Мировое производство топливного биоэтанола в 2015 году составило около 9,7 млрд дал [8]. На жидкое биотопливо учеными возлагаются большие надежды как на ресурс, потенциально способный смягчать последствия глобального изменения климата, содействовать достижению энергетической безопасности и поддерживать сельскохозяйственных производителей во всем мире [14]. Многие государства ссылаются на эти цели, обосновывая реализацию политики, стимулирующей производство и использование жидкого биотоплива на основе отходов сельскохозяйственного производства. Мировой опыт показывает, что жидкое биотопливо становится перспективной и популярной категорией энергетических ресурсов, которая по своему значению для мировой энергетики занимает следующую позицию после твердого топлива из биомассы. Несмотря на высокую себестоимость, мировое производство биоэтанола из целлюлозосодержащей биомассы динамично растет. Это происходит за счет экологически продуманной экономической политики на государственном уровне [15]. Мировым лидером по производству биоэтанола являются США – на их долю приходится около 57% мирового производства этанола, который в основном получают из кукурузы, данное производство использует более 1/3 урожая кукурузы США, что нарушает продовольственную безопасность страны. Второй по величине страной производителем биоэтанола является Бразилия, на которую приходится 27% мирового производства биоэтанола, основным сырьем для топливного биоэтанола в Бразилии является сахарный тростник [15].

С 2010 г. наблюдается устойчивая тенденция производства биоэтанола из целлюлозной биомассы, не представляющей угрозу продовольственной безопасности страны и не конкурирующей с пищевым сектором экономики. Существующее разнообразие целлю-

лозосодержащего недревесного сырья, такого как отходы сельского хозяйства и энергетические культуры, позволяет рассматривать множество потенциальных источников высокоэнергетической биомассы для производства биоэтанола, обладающих разным химическим составом и свойствами [9, 11].

В коммерциализации технологии этанола из биомассы в настоящий момент дальше всех продвинулась канадская компания «Iogen» – в год перерабатывается более 2,8 млн тонн растительных остатков (отходов сельского хозяйства, в том числе плодовых оболочек овса, и лесных отходов). Партнеры этой корпорации в Бразилии производят биоэтанол из жмыха сахарного тростника (багассы) [6]. Компания «Inbicon A/S» (Дания) разработала технологию превращения и переработки лигноцеллюлозной биомассы в топливо, заводы данной компании реализованы в ряде европейских стран, США, Канаде (сырьем являются пшеничная солома и отходы деревообработки), Китае (сырьем являются сельскохозяйственные отходы), Бразилии (сырьем является багасса), и Малайзии (сырьем является целлюлозная составляющая фруктов и шрот от производства пальмового масла) [5].

Общий ежегодный объем органических отходов АПК в нашей стране составляет около 593 млн тонн, из них отходов растениеводства – 220 млн тонн, потенциал производства биоэтанола из отходов растениеводства составляет 2,6 млрд дал в год. В России отсутствуют действующие заводы по производству биоэтанола второго поколения. В ИПХЭТ СО РАН активно ведутся исследования по получению биоэтанола из плодовых оболочек овса и мискантуса, разработанная технология успешно масштабирована на опытно-промышленном производстве [1–2, 12–13] и запатентована (Пат. 2581799 Россия, МПК C12P 7/10). Разработанная технология биоэтанола включает в себя этапы химической обработки сырья в одну стадию раствором гидроксида натрия [3], ферментативный гидролиз, совмещенный со спиртовым брожением, дистилляцию и ректификацию биоэтанола.

Сущность щелочной делигнификации заключается в удалении лигнина из композитной матрицы растения, кроме того, происходит гидролиз гемицеллюлоз. Механизм реакции включает омыление межмолекулярных эфирных связей, которыми прошиты гемицеллюлозы и лигнин. В результате омыления происходит расщепление этих связей и воздействие щелочи на микрофибриллы целлюлозы. Степень полимеризации целлюлозы снижается, одновременно происходит набухание целлюлозы, что приводит к увеличению её внутренней поверхности и делает целлюлозу более доступной для действия ферментов. Полученный субстрат представляет собой рыхлую массу светло-серого цвета с желтоватым оттенком, без запаха, при растирании в руках становятся видны остевые остатки ПОО.

В качестве сырья использован массовый отход сельского хозяйства – плодовые оболочки овса, на долю которых приходится 28% от всей массы зерна, то есть масса этого вида отходов только для Алтайского края составляет 0,31 млн т/год (по данным Алтайкрайстата). Использование плодовых оболочек овса в качестве сырья для производства биоэтанола обусловлено его низкой стоимостью и доступностью, обоснование выбора сырья приведено в работе [12].

Для реализации в производственных условиях ферментативного гидролиза необходимы эффективные и промышленно доступные целлюлолитические ферментные препараты, состоящие из карбогидраз, конвертирующих различные растительные полисахариды в простые сахара. Основными промышленными продуцентами таких препаратов являются микроскопические грибы, принадлежащие к роду *Trichoderma*, также показана высокая перспективность грибов *Penicillium, Chrysosporium* и *Acremonium*.

В данной работе для процесса ферментативного гидролиза использовались промышленно доступные ферментные препараты: «Целлолюкс-А» (производитель ООО ПО «Сиббиофарм», г. Бердск) и «Брюзайм BGX» (поставщик компания «Русфермент», г. Москва) в соответствии с аналитическими паспортами стандартизованы по целлюлазной и ксиланазной активности. Спиртовое брожение осуществляли с использованием дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-1693 Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (г. Москва). Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* ВКПМ Y-1693 являются основным продуцентом биоэтанола в России, применяемые в производстве этилового спирта как на пищевом сырье, так и на гидролизных средах. Сахаромицеты обладают высокой бродильной активностью, устойчивы к вредным примесям гидролизатов, хорошо переносят нарушения параметров технологического процесса спиртового брожения, а также остановки цехов на планово-предупредительный и капитальный ремонты.

Доза инокулята составила 12%. Целью данной работы являлся расчет себестоимости биоэтанола из плодовых оболочек овса в промышленном масштабе. Согласно дорожной карте РФ «Развитие биотехнологий и генной инженерии» от 18 июля 2013 г. № 1247-р проведение перепрофилирования простаивающих государственных предприятий по про-

изводству этилового спирта в предприятия по производству биоэтанола для биотоплива входит в список мер по развитию биоэнергетики.

Расчет произведен на основании результатов, полученных на опытно-промышленном производстве, где выход биоэтанола из плодовых оболочек овса, предобработанных в одну стадию раствором гидроксида натрия, составил – 12 дал/т. В данной работе приводится проектная производственная калькуляция себестоимости биоэтанола для ЗАО «Бийский спиртзавод». Завод оборудован в соответствии с действующими строительными нормами и правилами площади производственных помещений. На территории предприятия расположены: склады; основное производственное здание, в котором располагаются основные производственные цеха, цех розлива, цех ректификации; углекислотная, механический цех, здания заводоуправления; мастерские; скважины водозабора; котельная. Все здания связаны между собой асфальтными дорожками. Большая часть территории также заасфальтирована. Ширина проезжей части 10 м. На территории завода имеется очистное сооружение, сборники для водоотведения. Территория предприятия ограждена забором и имеет двое выездных ворот. Расположение технологических цехов обеспечивает поточность технологического процесса. Имеются пути для подъезда авто- и железнодорожного транспорта. В настоящее время завод не функционирует.

Для реализации проекта необходима только реконструкция цеха подготовки сырья (табл. 1), в связи с заменой зернового сырья на отходы зерновой промышленности – плодовые оболочки овса (табл. 2) – и необходимостью покупки специализированного оборудования для химической предварительной обработки сырья разбавленным раствором гидроксида натрия.

Таблица 1

Затраты на обустройство территории и реконструкцию цеха

Наименование затрат	Стоимость, руб.
Обустройство территории	326 000
Реконструкция цеха	560 000
Итого:	886 000

Таблица 2

Смета затрат на сырье и материалы

Наименование	Расход сырья и реактивов на 1 дал биоэтанола, кг	Стоимость 1 кг сырья и реактивов, руб.	Расход сырья и реактивов на годовой выпуск, кг	Стоимость сырья и реактивов, на годовой выпуск, руб.
Плодовые оболочки овса	83,3	0,3	63 974 400	19 192 320
Гидроксид натрия	6,64	41,0	5 099 520	209 080 320
«Целлолюкс-А»	0,0824	150	63 283,2	9 492 480
«Брюзайм-BGX»	0,0824	150	63 283,2	9 492 480
Итого:			247 257 600	

Таблица 3

Калькуляция себестоимости на единицу продукции и годовой выпуск

Статьи расхода	Затраты на единицу продукции, руб.	Стоимость годового выпуска, руб.
Сырье и материалы	322,0	247 257 600
Электроэнергия на технологические нужды	16,3	12 531 414
Водоснабжение и водоотведение на технологические нужды	15,8	12 113 920
Заработная плата сотрудников	9,6	7 396 267
Отчисления на социальные нужды ОПР	2,9	2 233 672
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	1,9	1 442 908
Цеховые расходы	21,8	16 738 592
Общезаводские расходы	32,7	25 107 889
Попутная продукция (углекислый газ)	50,4	38 707 200
Итого:	372,6	286 115 062

Таблица 4

Себестоимость этанола в некоторых странах

Сырьевой источник (страна, год)	Стоимость, $/литр этанола	Литературный источник	Стоимость на август 2016 г.*
Солома пшеницы (Мексика, 2013)	0,99–1,21	[10]	1,10–1,35
Сахарный тростник, включая жом и листья (Бразилия, 2016)	0,57	[7]	0,57
Кукурузные стебли (Испания – США, 2016)	1,20	[7]	1,20
Сахарная свекла (Франция, 2009)	0,60–0,68	[11]	0,67–0,76
Смесь лигноцеллюлозных материалов (США, 2007)	0,43	[11]	0,50

Примечание. * расчёт стоимости на август 2016 г. произведён согласно калькуляции https://www.statbureau.org/ru/united-states/inflation-calculators?dateBack=2010-1-1&dateTo=2016-8-1&amount=1000.

Проектная мощность завода – 2400 дал/сут (768000 дал /год) рассчитана исходя из мощности существующего производства и вводимого оборудования. Данный завод будет перерабатывать 64000 т плодовых оболочек овса в год, что соответствует 1/5 запасов Алтайского края. Расчет себестоимости выполнен согласно [4].

Известно, что попутной продукцией при спиртовом брожении является газ – диоксид углерода. Практический выход диоксида углерода составляет 70% к массе спирта, или 5,6 кг на 1 дал выработанного спирта. В условиях данного производства вырабатывается 4 300 800 кг диоксида углерода. Стоимость диоксида углерода составляет 9,0 руб/кг. Доход от продажи попутной продукции составит 38 707 200 руб/год.

С учетом производительности завода 768 000 дал биоэтанола в год и продажи попутной продукции себестоимость 1 дал биоэтанола составит 372,6 руб., или 37,26 руб. за 1 л биоэтанола, или 0,59 $.

Себестоимость биоэтанола из плодовых оболочек овса в данном проекте сопоставима с его себестоимостью из лигноцеллюлозного сырья в большинстве стран мира (табл. 4).

Приведенные данные показывают, что разработанная технология биоэтанола позволит получать конкурентоспособный продукт в условиях мирового рынка. Таким образом, показана целесообразность внедрения в промышленность технологии производства биоэтанола, разработанной в ИПХЭТ СО РАН с использованием в качестве сырья массового отхода сельского хозяйства – плодовых оболочек овса.

Список литературы

1. Байбакова О.В. Плодовые оболочки овса в качестве сырья для получения биоэтанола при масштабировании процесса по объему // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 9–2. – С. 215–218.

2. Байбакова О.В. Химико-энзиматическая конверсия в биоэтанол отходов злаковых культур // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2016. – Т. 6, № 2. – С. 51–56.

3. Байбакова О.В., Скиба Е.А., Будаева В.В., Золотухин В.Н. Щелочная делигнификация недревесного целлюлозосодержащего сырья в условиях опытного производства // Ползуновский вестник. – 2016. – Т. 1, № 4. – С. 147–151.

4. Основы проектирования химических производств: Учебник для вузов / Под ред. А. И. Михайличенко. – М.: ИКЦ «Академкнига». – 2010. – 371 с.

5. Global solutions // Inbicon [Электронный ресурс]. URL: http://www.inbicon.com/en.

6. Lawford H.G. Comparative ethanol productivities of different Zymomonas recombinants fermenting oat hull hydrolysate / H.G. Lawford, J.D. Rousseau, J.S. Tolan // Applied Biochemistry and Biotechnology. – 2001. – Vol. 91–93. – P. 133–146.

7. Cellulosic ethanol price hinges on feedstock cost Available at: http://biomassmagazine.com/articles/12958/lux-cellulosic-ethanol-price-hinges-on-feedstock-cost (accessed 2 February 2017).

8. World Fuel Ethanol Production Available at: http://ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#1454098996479-8715d404-e546 (accessed 2 February 2017).

9. Mussatto S.I., Dragone G., Guimaraes P.M.R., Silva J.P.A., Carneiro L.M., Roberto I.C., Vicente A., Domingues L., Teixeira J.A. Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production // Biotechnol. Adv. – 2010. – Vol. 28. – P. 817–830.

10. Sanchez A., Sevilla-Güitrón V., Magaña G., Gutierrez L. Parametric analysis of total costs and energy efficiency of 2G enzymatic ethanol production // Fuel. – 2013. – Vol. – 113. – P. 165–179.

11. Seungdo Kima, Bruce E. Dalea Comparing alternative cellulosic biomass biorefining systems: Centralized versus distributed processing systems // Biomass and Bioenergy. – 2015. – Vol. 74. – P. 135–147.

12. Skiba E.A., Budaeva V.V., Baibakova O.V., Zolotukhin V.N., Sakovich G.V. Dilute nitric-acid pretreatment of oat hulls for ethanol production // Biochemical Engineering Journal. http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2016.09.003.

13. Skiba E.A., Budaeva V.V., Baibakova O.V., Udoratina E.V., Shakhmatov E.G., Shcherbakova T.P., Kuchin A.V., Sakovich G.V. Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Materials in Aqueous Media and the Subsequent Microbiological Synthesis of Bioethanol // Catalysis in Industry. – 2016. – Vol. 8. – № 2. – P. 168–175.

14. Souza G.M., Victoria R., Joly C., Verdade L. Bioenergy and Sustainability: Bridging the Gaps. – 2015. – Vol. 72. – P. 779.

15. Yayuan Jin, Prabodh Illukpitiya Cost minimization of supplying biomass for ethanol biorefineries // Energy. – 2016. – Vol. 96. – P. 209–214.

References

1. Bajbakova O.V. Plodovye obolochki ovsa v kachestve syrja dlja poluchenija biojetanola pri masshtabirovanii processa po obemu // Fundamentalnye issledovanija. 2015. no. 9–2. pp. 215–218.

2. Bajbakova O.V. Himiko-jenzimaticheskaja konversija v biojetanol othodov zlakovyh kultur // Izvestija vuzov. Prikladnaja himija i biotehnologija. 2016. T. 6, no. 2. pp. 51–56.

3. Bajbakova O.V., Skiba E.A., Budaeva V.V., Zolotuhin V.N. Shhelochnaja delignifikacija nedrevesnogo celljulozosoderzhashhego syrja v uslovijah opytnogo proizvodstva // Polzunovskij vestnik. 2016. T. 1, no. 4. pp. 147–151.

4. Osnovy proektirovanija himicheskih proizvodstv: Uchebnik dlja vuzov / Pod red. A. I. Mihajlichenko. M.: IKC «Akademkniga». 2010. 371 p.

5. Global solutions // Inbicon [Jelektronnyj resurs]. URL: http://www.inbicon.com/en.

6. Lawford H.G. Comparative ethanol productivities of different Zymomonas recombinants fermenting oat hull hydrolysate / H.G. Lawford, J.D. Rousseau, J.S. Tolan // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2001. Vol. 91–93. pp. 133–146.

7. Cellulosic ethanol price hinges on feedstock cost Available at: http://biomassmagazine.com/articles/12958/lux-cellulosic-ethanol-price-hinges-on-feedstock-cost (accessed 2 February 2017).

8. World Fuel Ethanol Production Available at: http://ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#1454098996479-8715d404-e546 (accessed 2 February 2017).

9. Mussatto S.I., Dragone G., Guimaraes P.M.R., Silva J.P.A., Carneiro L.M., Roberto I.C., Vicente A., Domingues L., Teixeira J.A. Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production // Biotechnol. Adv. 2010. Vol. 28. pp. 817–830.

10. Sanchez A., Sevilla-Güitrón V., Magaña G., Gutierrez L. Parametric analysis of total costs and energy efficiency of 2G enzymatic ethanol production // Fuel. 2013. Vol. 113. pp. 165–179.

11. Seungdo Kima, Bruce E. Dalea Comparing alternative cellulosic biomass biorefining systems: Centralized versus distributed processing systems // Biomass and Bioenergy. 2015. Vol. 74. pp. 135–147.

12. Skiba E.A., Budaeva V.V., Baibakova O.V., Zolotukhin V.N., Sakovich G.V. Dilute nitric-acid pretreatment of oat hulls for ethanol production // Biochemical Engineering Journal. http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2016.09.003.

13. Skiba E.A., Budaeva V.V., Baibakova O.V., Udoratina E.V., Shakhmatov E.G., Shcherbakova T.P., Kuchin A.V., Sakovich G.V. Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Materials in Aqueous Media and the Subsequent Microbiological Synthesis of Bioethanol // Catalysis in Industry. 2016. Vol. 8. no. 2. pp. 168–175.

14. Souza G.M., Victoria R., Joly C., Verdade L. Bioenergy and Sustainability: Bridging the Gaps. 2015. Vol. 72. pp. 779.

15. Yayuan Jin, Prabodh Illukpitiya Cost minimization of supplying biomass for ethanol biorefineries // Energy. 2016. Vol. 96. pp. 209–214.