

**Семенихин С.О., Городецкий В.О., Даишева Н.М., Котляревская Н.И.
СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ
АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА ИЗ СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА**

Семенихин Семен Олегович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела технологии сахара и сахаристых продуктов

Краснодарский НИИ хранения и переработки сельскохозяйственной продукции – филиала ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия» (КНИИХП – филиал ФГБНУ СКФНЦСВВ), Краснодар, Россия

E-mail: semenikhin_s_o@mail.ru

Городецкий Владимир Олегович, кандидат технических наук, заведующий отделом технологии сахара и сахаристых продуктов

КНИИХП – филиал ФГБНУ СКФНЦСВВ, Краснодар, Россия

E-mail: gorodecky_v_o@mail.ru

Даишева Наиля Мидхатовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела технологии сахара и сахаристых продуктов

КНИИХП – филиал ФГБНУ СКФНЦСВВ, Краснодар, Россия

E-mail: daisheva_n_m@mail.ru

Котляревская Наталья Ивановна, научный сотрудник отдела технологии сахара и сахаристых продуктов

КНИИХП – филиал ФГБНУ СКФНЦСВВ, Краснодар, Россия

E-mail: kotlyarevskaya_n_i@mail.ru

*Свекловичный жом является вторичным ресурсом сахарной отрасли, состоящим в основном из высокомолекулярных полисахаридов. Невостребованность 1/8 части свекловичного жома отечественной промышленностью обуславливает его перспективность в качестве основного носителя питательных веществ для микробиологической промышленности, в частности, микробиологического синтеза альтернативного топлива. В статье представлен обзор отечественных и зарубежных научных исследований по получению топливных ресурсов, альтернативных природным. Основными из них являются водород, метан, этанол, бутанол и ацетон. В настоящее время, наибольший выход получаемых микробиологическим путем топливных ресурсов достигает 0,4 г/г сахаров. В случае применения *Escherichia coli* конечным продуктом является этанол, а *Clostridium beijerinckii* – ацетон и бутанол. Выработка метана находится на уровне 502,5 л/кг летучих твердых веществ, а водорода – 197,9 мл/г общего углерода, однако применяемые микроорганизмы авторами не названы. Важную роль для достижения таких показателей оказывает способ подготовки свекловичного жома, так как необходимо гидролизовать наибольшее количество полисахаридов в моносахариды.*

*Так, предварительная обработка свекловичного жома серной кислотой позволяет повысить степень гидролиза с 33 % до 93 %. Кроме этого, свекловичный жом можно применять для иммобилизации *Saccharomyces cerevisiae* при обработке растворов мелассы или сиропа для синтеза этанола, обеспечивая до 7 циклов ферментации, прежде чем*

удерживающий агент утратит свои свойства. Выработка этанола при этом составит 0,446 г/г сахаров.

Рассмотрены работы, направленные на технико-экономическую оценку возможности реализации установок по выработке биогаза на сахарных заводах для различных регионов России.

Однако, так как Россия является страной, обладающей значительными запасами ископаемого топлива, то сроки окупаемости внедрения биогазовых установок достаточно высокие.

Ключевые слова: свекловичный жом, этанол, водород, метан, бутанол, ацетон.



Для цитирования: Современные исследования и перспективы получения альтернативного топлива из свекловичного жома / Семенихин С.О., Городецкий В.О., Дайшева Н.М., Котляревская Н.И. // Новые технологии. 2020. Вып. 3(53). С. 71-79. DOI: 10.24411/2072-0920-2020-10308.

**Semenikhin S.O., Gorodetsky V.O., Daisheva N.M., Kotlyarevskaya N.I.
MODERN RESEARCH AND PERSPECTIVES FOR PRODUCING
ALTERNATIVE FUEL FROM BEET PULP**

Semenikhin Semen Olegovich, Candidate of Technical Sciences, a senior researcher of the Department of Technology of Sugar and Sugar Products

Krasnodar Research Institute of Storage and Processing of Agricultural Products - a branch of the FSBSI «The North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, Winemaking» (KRISP - a branch of the FSBSI NCFSCHVW), Krasnodar, Russia

E-mail: semenikhin_s_o@mail.ru

Gorodetsky Vladimir Olegovich, Candidate of Technical Sciences, head of the Department of Technology of Sugar and Sugar Products

KRISP - a branch of the FSBSI NCFSCHVW, Krasnodar, Russia

E-mail: gorodecky_v_o@mail.ru

Daisheva Naila Midhatovna, Candidate of Technical Sciences, a senior researcher of the Department of Technology of Sugar and Sugar Products

KRISP - a branch of the FSBSI NCFSCHVW, Krasnodar, Russia

E-mail: daisheva_n_m@mail.ru

Kotlyarevskaya Natalya Ivanovna, a researcher of the Department of Technology of Sugar and Sugar Products

KRISP - a branch of the FSBSI NCFSCHVW, Krasnodar, Russia

E-mail: kotlyarevskaya_n_i@mail.ru

*Beet pulp is a secondary resource of the sugar industry which consists mainly of high molecular weight polysaccharides. However, 1/8 of beet pulp is not demanded by domestic industry but this fact makes it promising as the main carrier of nutrients for the microbiological industry, in particular, the microbiological synthesis of alternative fuels. The article provides an overview of domestic and foreign scientific research on obtaining alternative fuel resources. The main ones are hydrogen, methane, ethanol, butanol and acetone. Currently, the highest yield of fuel resources obtained by the microbiological method reaches 0.4 g/g of sugars. When using *Escherichia coli*, the end product is ethanol, and *Clostridium beijerinckii* is acetone and butanol.*

Methane production is at the level of 502.5 l/kg of volatile solids, and that of hydrogen is 197.9 ml/g of total carbon, however, the microorganisms used are not named by the authors. To achieve such indicators the method of preparing beet pulp is important, since it is necessary to hydrolyze the largest amount of polysaccharides into monosaccharides. So, pre-treatment of beet pulp with sulfuric acid can increase the degree of hydrolysis from 33% to 93%.

*In addition, beet pulp can be used to immobilize *Saccharomyces cerevisiae* when processing molasses or syrup solutions for ethanol synthesis, providing up to 7 fermentation cycles before the retention agent loses its properties. The production of ethanol in this case will be 0.446 g/g of sugars. The works aimed at a feasibility study of the feasibility of installing biogas plants at sugar factories for various regions of Russia are considered. However, since Russia is a country with significant reserves of fossil fuels, the payback period for the introduction of biogas plants is quite high.*

Key words: *beet pulp, ethanol, hydrogen, methane, butanol, acetone.*

For citation: Modern research and perspectives for producing alternative fuel from beet pulp / Semenikhin S.O., Gorodetsky V.O., Daisheva N.M., Kotlyarevskaya N.I. // *Novye Tehnologii (Majkop)*. 2020. Issue 3(53). P. 71-79. DOI: 10.24411/2072-0920-2020-10308.

Свекловичный жом является многотоннажным вторичным ресурсом свеклосахарной отрасли пищевой промышленности и представляет собой обессахаренную свекловичную стружку. Вследствие этого, по своему химическому составу в основном он представлен пищевыми волокнами такими, как пектиновые вещества, гемицеллюлозы, целлюлоза и лигнин.

Среднегодовое количество перерабатываемой сахарной свеклы в Российской Федерации составляет 40-50 млн. т. Количество вырабатываемого сырого свекловичного жома зависит от конструкции диффузионного аппарата и составляет 70 % к массе свеклы для колонных, 70 % для ПДС, 90 % для ДС и 84 % для ротационных диффузионных установок. Таким образом, ориентировочное количество получаемого жома составляет 35-40 млн. т, большая часть которого гранулируется и используется в качестве корма для крупного рогатого скота как внутри страны, так и для отправки на экспорт. Однако, по различным оценкам до 4-5 млн. т сырого свекловичного жома остается невостребованным, вследствие чего жом скисает и переходит в отходы, оказывая негативное воздействие на окружающую среду.

Учитывая, что пищевые волокна являются высокомолекулярными полисахаридами, это обуславливает перспективность применения невостребованного свекловичного жома в качестве сырья для микробиологической промышленности, как основного носителя питательных веществ. Традиционно в микробиологической промышленности для этой цели применяется другой вторичный ресурс сахарной отрасли – меласса, что обуславливает больший интерес среди исследователей в области ее микробиологической обработки [1, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Однако, невостребованность свекловичного жома делает его перспективным с экономической точки зрения, так как цена жома значительно ниже, чем цена мелассы.

В настоящее время исследования, направленные на получение альтернативных видов топлива, таких, как водород, этанол, биогаз и др., из свекловичного жома получили достаточно широкое распространение. В большей степени это обусловлено отсутствием в

некоторых странах ископаемых топливных ресурсов, а в меньшей – общемировой тенденцией на экологизацию промышленности, особенно в Европейских странах.

Традиционно, в микробиологической промышленности для синтеза этанола применяются *Zygomonas mobilis* и *Saccharomyces cerevisiae*. Однако, указанные микроорганизмы применяют для обработки жидких продуктов, в то время как свекловичный жом является сыпучим материалом, но обладающим высокой влажностью – до 90 %, то есть его микробиологическая обработка носит твердофазный характер. Вследствие этого, для получения альтернативного топлива из свекловичного жома применяются другие виды микроорганизмов.

Коллектив американских исследователей провел комплексную работу по хранению, гидролизу и ферментации свекловичного жома для производства этанола [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Для выработки этанола из силосованного жома применяли *Escherichia coli* штамм *KO11*. Общеизвестно, что закладка сырого свекловичного жома на хранение позволяет сохранять его свойства, так как из-за высокого содержания влаги он подвержен молочнокислому брожению. Установлено, что выработка этанола из силосованного жома на 50 % выше, чем при обработке свежего свекловичного жома. Также выявлено, что периодическая обработка с подпиткой дает приблизительно на 30 % более высокий выход этанола, чем непрерывная, при которой обработке подвергается все количество жома. Наибольшая выработка этанола составила 0,2 г/г сухих веществ свекловичного жома при содержании сухих веществ в растворе 10 %. При повышении сухих веществ до 12 % наблюдалось ингибирование *Escherichia coli* штамм *KO11*, вызванное, по мнению авторов, глюкозой.

В более поздней работе этим коллективом исследователей изучен вопрос влияния предварительной обработки свекловичного жома серной кислотой при производстве этанола с применением *Escherichia coli* штамм *KO11* [3]. Установлено, что предварительная обработка кислотой позволяет повысить степень гидролиза полисахаридов свекловичного жома до моносахаридов с 33 % до 93 %. Оптимальные условия при этом: температура – 120°C, концентрация серной кислоты – 0,66 % и содержание сухих веществ в реакторе – 6 %. Выход этанола из предварительно обработанного свекловичного жома увеличился в 2 раза и составил 0,4 г этанола / г сухих веществ свекловичного жома.

В работе турецких исследователей приведена характеристика производства этанола с использованием дрожжей *Pichia Conditionitis* в различных питательных средах, а именно, синтетической ксилозе, гидролизованном серной кислотой свекловичном жоме, а также смеси гидролизата свекловичного жома и синтетической ксилозы [4]. Примечательно, что перед внесением микроорганизмов ингибирующие вещества, образуемые при гидролизе жома, были детоксифицированы различными адсорбентами. Установлено, что добавление ксилозы в раствор гидролизата улучшает скорость накопления биомассы дрожжей, однако на конечную выработку этанола это влияние незначительно. В конечном итоге, при оптимальных условиях конечная концентрация этанола в реакторе составила 10,8-12,2 г/л при скорости синтеза 0,119-0,286 (г/л)/ч и продолжительности процесса обработки 50-121 ч.

Сербскими учеными исследован потенциал сырого свекловичного жома и сушеного свекловичного жома не как сырья, а как экономически целесообразного и возобновляемого средства для иммобилизации *Saccharomyces cerevisiae* при производстве этанола [5]. Исследуемые образцы в равной степени проявили удерживающую

способность. Установлено, что свекловичный жом способен обеспечить до 7 циклов ферментации этанола прежде чем утрачивает удерживающую способность. В качестве субстрата применяли сироп и мелассу, которые разбавляли до различного содержания сахарозы в растворе – 10 и 12 %, после чего рН растворов доводили 10 %-ной серной кислотой до 5,5. Выявлено, что выбранные исследователями содержания сахарозы в растворах обеспечивают примерно равную степень выработки этанола, независимо от субстрата. Выработка этанола из субстратов составила $52,26 \pm 2,0$ г/л при скорости синтеза $0,446 \pm 0,017$ г/г сахаров в час и начальной концентрации сахаров в растворе 120 г/л. Утилизация сахаров составила $97,52 \pm 0,15$ %.

Польские исследователи изучали влияние условий обработки свекловичного жома горячей водой на степень гидролиза пищевых волокон при анаэробном микробиологическом синтезе метана [6]. Конкретный штамм или вид применяемого микроорганизма в работе не указан. Свекловичный жом подвергали гидротермальной обработке при температуре в диапазоне от 120 до 200°C. Установлено, что гидротермальная обработка при температуре 160°C обеспечивает наибольшую концентрацию свободной глюкозы, кислот и альдегидов в растворе, а также наибольшую выработку метана – 502,50 л/кг летучих твердых веществ.

Турецкие исследователи провели работу по выработке биоводорода из сахарной свеклы [7]. В качестве исходного сырья применяли корнеплоды сахарной свеклы, а не свекловичный жом. Конкретный штамм или вид применяемого микроорганизма в работе не указан. Исследовано влияние исходного количества сахарной свеклы, биомассы и степени измельчения сахарной свеклы на выработку биоводорода. Установлено, что степень измельчения сахарной свеклы до размера частиц 0,1 см при концентрации биомассы в растворе 24,6 г/л обеспечивает максимальную выработку водорода на уровне 197,9 мл/г общего углерода.

Испанские исследователи изучали возможность применения свекловичного жома для ацетон-бутанол-этаноловой (АБЭ) ферментации с применением *Clostridium beijerinckii* [8]. Подготовку субстрата проводили аналогично ранее рассмотренному способу [3]. Содержание сухих веществ в обрабатываемых растворах составило 5,0, 7,5 и 10,0 %. Степень гидролиза полисахаридов свекловичного жома до моносахаридов составила от 66,2 до 70,6 %. В работе отмечено, что стандартное соотношение углеводов при АБЭ-ферментации чистых углеводных растворов составляет 3:6:1, где бутанол является основным продуктом. Однако, в экспериментальных условиях было получено 143,2 г углеводов из 1 кг свекловичного жома (62,3 г ацетона и 80,9 г бутанола при отсутствии этанола) при содержании сухих веществ в реакторе 7,5 %. Таким образом, примерная пропорция составила 3:4:0. При пересчете на количество утилизированных сахаров максимальная выработка углеводов составила 0,4 г/г сахаров. Примечательно, что исследования проводились без поддержания постоянного значения рН в реакторе, которое к концу ферментации достигало примерного значения 5,3 во всех сериях исследований.

Следует отметить, что в настоящее время за рубежом на при заводских территориях уже внедряются полупромышленные установки по выработке биогаза из свекловичного жома [9]. Отмечено, что основным синтезируемым продуктом является метан – до 60 %. Однако, получаемый биогаз не подвергается очистке от примесей, вследствие чего его

тепловой потенциал в два раза ниже, чем у природного газа. Тем не менее, с целью снижения расхода условного топлива он применяется в топках заводских паровых котлов.

Исследователи из Казанского инновационного университета им. В.Г. Тимирязова провели технико-экономическую оценку возможности реализации установок по выработке биогаза на сахарных заводах для различных регионов России. Согласно приводимой информации, предлагается осуществлять многоступенчатое сбраживание свекловичного жома анаэробными микроорганизмами. Принципиально приводимая авторами схема, не отличается от применяемых в настоящее время за рубежом. В своих расчетах авторы показывают, что при переработке всего количества получаемого свекловичного жома в биогаз 25 % образуемого объема полностью обеспечат внутренние потребности завода в топливе, а 75 % объема может быть использовано для выработки тепловой и электрической энергии для муниципальных нужд. Прогнозируемый срок окупаемости от внедрения биогазовых установок на свеклосахарных заводах составляет в среднем от 11 до 14 лет [10-12].

Однако, сделанное авторами допущение, что все количество свекловичного жома может быть переработано в биогаз, несколько не соответствует реалиям. Учитывая, что в среднем 1/8 часть получаемого жома остается невостребованной, то, соответственно только это количество может быть использовано для выработки биогаза. Таким образом, потребности завода можно будет обеспечить только лишь на половину, а сверхприбыль от реализации топливно-энергетических ресурсов будет отсутствовать вовсе, вследствие чего фактический срок окупаемости будет значительно выше.

Проведенный обзор отечественных и зарубежных исследований показал перспективность исследований получения альтернативного топлива из свекловичного жома. В различных работах авторов отмечается, что количество получаемых микробиологическим путем топливных ресурсов достигает 0,4 г/г сахаров, что фактически является 40 % КПД. Что касается чистоты получаемого биогаза 60 %, то проведение исследований в области его очистки с последующей разработкой и внедрением технологии позволит повысить этот показатель, тем самым повысив тепловой потенциал биогаза до значений, близких к природному газу. Практическая значимость таких работ обусловлена тем, что промышленная реализация наработок уже существует в мировой практике.

Однако, так как Россия является страной, обладающей значительными запасами ископаемого топлива, то исследования в области получения биогаза из свекловичного жома не так актуальны, как в других странах. Тем не менее, фундаментальное значение отечественных исследований в этой области будет достаточно высоким.

Литература:

1. Обзор современных исследований в области переработки мелассы для получения биологически активных веществ / Семенихин С.О. [и др.] // Новые технологии. 2019. Вып. 2. С. 97-107.
1. Анализ способов микробиологической обработки мелассы для получения альтернативных видов топлива / Семенихин С.О. [и др.] // Известия ВУЗов. Пищевая технология. 2019. №5/6. С. 6-9.
2. VanderGheynst. Integrating sugar beet pulp storage, hydrolysis and fermentation for fuel ethanol production / Yi Zheng [et al] // Applied Energy. 2012. No. 93. P. 168-175.

3. VanderGheynst. Dilute acid pretreatment and fermentation of sugar beet pulp to ethanol / Yi Zheng [et al] // *Applied Energy*. 2013. No. 105. P. 1-7.
4. Hande Günan Yücel, Zümriye Aksu. Ethanol fermentation characteristics of *Pichia stipitis* yeast from sugar beet pulp hydrolysate: Use of new detoxification methods // *Fuel*. 2015. No. 158. P. 793-799.
5. Vesna M. Vucurovic, Radojka N. Razmovski. Sugar beet pulp as support for *Saccharomyces cerevisiae* immobilization in bioethanol production // *Industrial Crops and Products*. 2012. No. 39. P. 128-134.
6. Effects of hydrothermal pretreatment of sugar beet pulp for methane production / K. Zieminski [et al] // *Bioresource Technology*. 2014. No. 166. P. 187-193.
7. Serkan E., Burcu E. Biohydrogen production by extracted fermentation from sugar beet // *International journal of hydrogen energy*. 2018. No. 3. P. 10645-10654.
8. Carolina Bellido, Celia Infante, Mónica Coca, Gerardo González-Benito, Susana Lucas, María Teresa García-Cubero. Efficient acetone-butanol-ethanol production by *Clostridium beijerinckii* from sugar beet pulp // *Bioresource Technology*. 2015. No. 190. P. 332-338.
9. Федорук В.А., Лоскутов А.Ю., Бушмин И.С. Возможности по использованию отходов свеклосахарного производства / Голыбин В.А. [и др.] // *Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства*. 2016. Т. 1, №9. С. 34-36.
10. Мансуров Р.Е., Заседова А.А. Техничко-экономическая оценка возможностей свеклосахарного подкомплекса Саратовской области по выработке биогаза из свекловичного жома сахарного завода // *Экономический журнал*. 2017. №4(48). С. 6-19.
11. Мансуров Р.Е. Техничко-экономический анализ возможностей свеклосахарного подкомплекса Нижегородской области по выработке биогаза // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Социальные науки*. 2018. №4(52). С. 23-29.
12. Мансуров Р.Е. Техничко-экономическая оценка перспектив свеклосахарного подкомплекса Рязанской области по выработке биогаза из свекловичного жома сахарного завода // *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2019. №1(26). С. 113-121.

Literature:

1. Overview of modern research in the field of molasses processing to obtain biologically active substances / Semenikhin S.O. [et al.] // *Novye Tehnologii*. 2019. Issue 2. P. 97-107.
2. Analysis of the methods of microbiological treatment of molasses to obtain alternative fuels / Semenikhin S.O. [and others] // *Proceedings of universities. Food technology*. 2019. No 5/6. P. 6-9.
3. VanderGheynst. Integrating sugar beet pulp storage, hydrolysis and fermentation for fuel ethanol production / Yi Zheng [et al] // *Applied Energy*. 2012. No. 93. P. 168-175.
4. VanderGheynst. Dilute acid pretreatment and fermentation of sugar beet pulp to ethanol / Yi Zheng [et al] // *Applied Energy*. 2013. No. 105. P. 1-7.
5. Hande Günan Yücel, Zümriye Aksu. Ethanol fermentation characteristics of *Pichia stipitis* yeast from sugar beet pulp hydrolysate: Use of new detoxification methods // *Fuel*. 2015. No. 158. P. 793-799.

6. Vesna M. Vucurovic, Radojka N. Razmovski. Sugar beet pulp as support for *Saccharomyces cerevisiae* immobilization in bioethanol production // *Industrial Crops and Products*. 2012. No. 39. P. 128-134.
7. Effects of hydrothermal pretreatment of sugar beet pulp for methane production / K. Zieminski [et al] // *Bioresource Technology*. 2014. No. 166. P. 187-193.
8. Serkan E., Burcu E. Biohydrogen production by extracted fermentation from sugar beet // *International journal of hydrogen energy*. 2018. No. 3. P. 10645-10654.
9. Carolina Bellido, Celia Infante, Monica Coca, Gerardo González-Benito, Susana Lucas, María Teresa García-Cubero. Efficient acetone – butanol – ethanol production by *Clostridium beijerinckii* from sugar beet pulp // *Bioresource Technology*. 2015. No. 190. P. 332-338.
10. Fedoruk V.A., Loskutov A.Yu., Bushmin I.S. Possibilities for the use of beet sugar production / Golybin V.A. [et al.] // *Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific Research Institute of Sheep and Goat Breeding*. 2016. Vol. 1, No. 9. P. 34-36.
11. Mansurov R.E., Zasedova A.A. Technical and economic assessment of the capabilities of the beet-sugar subcomplex of the Saratov region for the production of biogas from beet pulp of a sugar factory // *Economic Journal*. 2017. No. 4(48). P. 6-19.
12. Mansurov R.E. Technical and economic analysis of the capabilities of the sugar beet subcomplex of the Nizhny Novgorod region for biogas production // *Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky. Series: Social Sciences*. 2018. No 4(52). P. 23-29.
13. Mansurov R.E. Technical and economic assessment of the prospects of the beet-sugar subcomplex of the Ryazan region for the production of biogas from beet pulp of a sugar factory // *Agrarian Bulletin of the Upper Volga Region*. 2019. No 1(26). P. 113-121.