

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2625>  
<https://elibrary.ru/MXWXVR>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Получение целлюлозы и гемицеллюлоз из депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома



С. О. Семенихин\*<sup>ORCID</sup>, А. А. Фабрицкая<sup>ORCID</sup>, Н. М. Даишева<sup>ORCID</sup>

Краснодарский научно-исследовательский институт хранения и переработки  
сельскохозяйственной продукции<sup>ROR</sup>, Краснодар, Россия

Поступила в редакцию: 08.09.2025

Принята после рецензирования: 14.10.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

\*e-mail: [semenikhin\\_s\\_o@mail.ru](mailto:semenikhin_s_o@mail.ru)

© С. О. Семенихин, А. А. Фабрицкая, Н. М. Даишева, 2026



### Аннотация.

Современные технологии производства пищевых продуктов невозможны без применения функциональных добавок, особенно полисахаридов, проявляющих технологические свойства загустителей, стабилизаторов, эмульгаторов. Особый интерес представляют целлюлоза и гемицеллюлозы, которые в России не производятся. Цель исследования – разработка технологических режимов получения из депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома целлюлозы и гемицеллюлоз, соответствующих по своим показателям качества требованиям действующей нормативной документации – ГОСТ и ТР ТС.

Объекты исследования – свекловичный жом и получаемые из него целлюлоза и гемицеллюлозы. В работе рассмотрено влияние концентрации растворов гидроксида натрия и продолжительности обработки свекловичного жома на эффективность извлечения гемицеллюлоз, действие промывки получаемых гемицеллюлоз этанолом на их чистоту, а также воздействие обработки целлюлозосодержащего концентрата растворами соляной кислоты на результативность получения целлюлозы. Органолептические и физико-химические показатели определяли согласно общепринятым методикам.

Установлено, что увеличение концентрации раствора гидроксида натрия и продолжительности обработки свекловичного жома оказывает существенное влияние на химический состав и выход извлекаемых гемицеллюлоз. Наибольший выход гемицеллюлоз наблюдался при концентрации раствора гидроксида натрия в диапазоне 1,5–3,0 %, при дальнейшем ее увеличении происходило частичное снижение содержания гемицеллюлоз вследствие протекания реакций щелочного гидролиза. Также показано, что при щелочной экстракции совместно с гемицеллюлозами частично извлекается пектин, что может быть связано со сходством механизмов извлечения данных гидроколлоидов. Однако процесс сопутствующего извлечения пектина при щелочном извлечении гемицеллюлоз требует проведения более глубоких исследований. В результате исследования установлены эффективные режимы получения целевых продуктов: гемицеллюлозы извлекают экстракцией 2 % раствором гидроксида натрия в течение 3 ч при 25 °С с последующей двукратной промывкой 70 % этанолом; целлюлозу получают в ходе обработки 15 % раствором соляной кислоты в течение 5 ч при 60 °С. Целлюлоза и гемицеллюлозы, полученные в рамках исследования, по органолептическим и физико-химическим показателям соответствуют требованиям ГОСТ за исключением происхождения сырья.

Свекловичный жом является перспективным источником целлюлозы и гемицеллюлоз, что позволит обеспечить импортозамещение и повысить переработку вторичных ресурсов. Однако для использования свекловичных целлюлозы и гемицеллюлоз в пищевой промышленности требуется разработка нормативной документации.

**Ключевые слова.** Свекловичный жом, целлюлоза, гемицеллюлозы, гидролиз, экстракция, минеральная кислота, щелочь, пищевые добавки

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-26-20065, <https://rscf.ru/project/24-26-20065/>

**Для цитирования:** Семенихин С. О., Фабрицкая А. А., Даишева Н. М. Получение целлюлозы и гемицеллюлоз из депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома. Техника и технология пищевых производств. 2026 Т. 56. № 1 С. 97–110. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2625>

## Obtaining Cellulose and Hemicelluloses from Depectinized and Delignified Sugar Beet Pulp



Semyon O. Semenikhin\*<sup>ORCID</sup>, Alla A. Fabritskaya<sup>ORCID</sup>,  
Nailya M. Daisheva<sup>ORCID</sup>

Krasnodar Research Institute for Storage and Processing of Agricultural Products<sup>FOR</sup>, Krasnodar, Russia

Received: 08.09.2025  
Revised: 14.10.2025  
Accepted: 13.01.2026

\*e-mail: [semenikhin\\_s\\_o@mail.ru](mailto:semenikhin_s_o@mail.ru)  
© S.O. Semenikhin, A.A. Fabritskaya, N.M. Daisheva, 2026



### Abstract.

Advanced food production relies heavily on functional additives. Polysaccharides are functional food additives that combine the technological properties of thickeners, stabilizers, and emulsifiers. The absence of domestic cellulose and hemicellulose production remains a significant barrier to import substitution in Russia. This article introduces new processing technologies for producing commercial cellulose and hemicellulose from depectinized and delignified sugar beet pulp.

The experiment featured the effect of such variables as sodium hydroxide concentration and processing time on the efficiency of hemicellulose extraction. The obtained cellulose and hemicellulose were tested for the effect of washing on purity, as well as the effect of hydrochloric acid treatment on cellulose yield. The sensory and physicochemical tests involved standard research methods.

The most effective production conditions were as follows. Hemicellulose was extracted with a 2% sodium hydroxide solution at 25°C for 3 h and washed with 70% ethanol. Cellulose was treated with a 15% hydrochloric acid solution for at 60°C 5 h. The resulting cellulose and hemicellulose met the sensory and physicochemical standards in all aspects but raw material.

Beet pulp proved to be a promising source of cellulose and hemicellulose with good import substitution and recycling prospects. However, the use of beet cellulose and hemicellulose in the food industry requires updating the existing regulatory documentation.

**Keywords.** Sugar beet pulp, cellulose, hemicelluloses, hydrolysis, extraction, mineral acid, alkali, food additives

**Funding.** The study was supported by the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation (Project No. 24-26-20065, <https://rscf.ru/en/project/24-26-20065/>)

**For citation:** Semenikhin SO, Fabritskaya AA, Daisheva NM. Obtaining Cellulose and Hemicelluloses from Depectinized and Delignified Sugar Beet Pulp. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):97–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2625>

### Введение

Для достижения нужного качества продуктов в современном производстве необходимы пищевые добавки. Ключевую роль среди них занимают полисахариды: целлюлоза и гемицеллюлозы. Их используют в качестве загустителей, стабилизаторов, эмульгаторов, а также для удержания влаги и предотвращения слеживания. В настоящее время на российском рынке пищевые добавки – целлюлоза (E426) и гемицеллюлозы (E460) – не производятся и представлены только дорогостоящими импортными аналогами, в основном китайского производства.

Целлюлоза является нерастворимым компонентом клеточных стенок растений, отличается высокой сорбционной активностью и способностью связывать значительное количество влаги. Введение целлюлозы в рецептуру пищевых продуктов способствует повышению их влагоудерживающей и жироудерживающей

способности, стабилизации текстуры [1, 2]. Указанные свойства позволяют использовать целлюлозу в составе хлебобулочных, мясных и кондитерских изделий для улучшения их структурно-механических характеристик и продления сроков хранения [3–7]. Целлюлоза выступает в качестве пищевых волокон, обеспечивающих антитоксический эффект, нормализацию работы желудочно-кишечного тракта, снижение калорийности и формирование пролонгированного чувства насыщения [8, 9]. Эти качества определяют ее востребованность при производстве диетических и функциональных продуктов питания. Существуют способы производства растворимой целлюлозы, из которой в дальнейшем возможно получение эфиров, востребованных в пищевой промышленности и косметике [10].

Гемицеллюлозы представляют собой группу полисахаридов с более сложным и разнообразным строе-

нием, однако в большей степени преобладают две основные их разновидности: ксилоглюкан и арабиноксилан [11]. Структурная неоднородность молекул гемицеллюлоз определяет их широкую функциональную активность: в отличие от целлюлозы, гемицеллюлозы частично растворимы в воде и способны формировать вязко-эластические системы, что позволяет использовать их в качестве стабилизаторов, загустителей и эмульгаторов [12,13]. Их присутствие в составе рецептур способствует улучшению органолептических характеристик готовых изделий, повышению вязкости и однородности консистенции, предотвращению расслоения эмульсионных и суспензионных систем [14]. Важным свойством гемицеллюлоз является способность образовывать комплексы с белками и связывать ионы металлов, что при производстве пищевых продуктов обеспечивает придание им функциональных свойств [15].

Применение целлюлозы и гемицеллюлоз в пищевых технологиях представляет собой один из ключевых факторов целенаправленного формирования их потребительских свойств. Сочетание технологических преимуществ полисахаридов с возможностью получения их из вторичного сырья открывает перспективы для создания продуктов функционального и специализированного назначения.

Традиционными источниками получения целлюлозы выступают отходы деревообрабатывающей промышленности. Для ее выделения применяются химические методы, включающие щелочную, сульфатную или сульфитную обработку древесины, что позволяет разрушить матрицу лигнина и высвободить целлюлозные волокна [16]. В современных исследованиях в качестве сырья для получения целлюлозы рассматривают отходы пищевой промышленности (солома злаковых культур, оливковые косточки, пустые грозди плодов масличной пальмы) и различное нетрадиционное сырье: астрагал, шандра обыкновенная, семена фиников, фуражные бобы и др. [17–24].

Гемицеллюлозы преимущественно извлекаются из побочных продуктов переработки сои [25]. В ряде научных исследований рассматриваются отходы деревообрабатывающей промышленности (бука, березы, эвкалипта, агбы), пищевой промышленности (солома злаковых культур, пивная дробина, стебли кукурузы) и нетипичное сырье – африканская роза, сахарное сорго, ежа сборная, бамбук и др. [12, 13, 26–34]. В промышленности для выделения гемицеллюлоз применяют щелочной или ферментативный гидролиз и экстракцию горячей водой под давлением, что обеспечивает разрушение межмолекулярных связей и переход гемицеллюлоз в экстрагент [13]. В качестве перспективных технологий получения гемицеллюлоз рассматривают мембранную фильтрацию, ультразвуковую обработку и обработку электромагнитными полями.

В настоящее время особое значение приобретает вопрос рационального использования растительного

сырья и вторичных ресурсов пищевой промышленности [35]. Учитывая, что целлюлоза и гемицеллюлозы имеют структурный состав клеточных стенок всех растений, переработка отходов кажется более рациональной и приводит к появлению многотоннажных пищевых продуктов. В этом случае перспективным сырьем выступает свекловичный жом – побочный продукт свеклосахарной промышленности, используемый в качестве корма для крупного рогатого скота.

Сухие вещества свекловичного жома на 80 % состоят из пищевых волокон: целлюлозы (25–26 %), гемицеллюлоз (25–26 %), пектиновых веществ (19–20 %) и лигнина (6–9 %), а также белков (7–8 %), минеральных веществ (4–5 %) и остаточной влаги (8–10 %). Анализ литературы показывает, что исследуемое сырье, как правило, содержало 30–60 % целлюлозы, гемицеллюлозы – 20–40 % и лигнина – 20–40 % [17–34]. В ряде исследований отмечается, что наиболее эффективным способом извлечения гемицеллюлоз из отходов деревообрабатывающей промышленности и пищевых производств является щелочная экстракция: концентрация раствора щелочи должна составлять около 10–15 %. Свекловичный жом содержит значительное количество пектиновых веществ, выступающих в качестве связующего звена между слоями клеточной стенки растений. После депектинизации проницаемость клеточной стенки свекловичного жома должна быть выше, а концентрация раствора щелочи – ниже. Из-за высокого содержания пектиновых веществ свекловичный жом ранее рассматривался в основном как перспективный источник низкоэтерифицированного пектина [36–39]. Однако побочный продукт, получаемый после депектинизации жома, до сих пор не находил дальнейшего применения.

Комплексная переработка свекловичного жома с получением пектина, целлюлозы и гемицеллюлоз позволит не только решить экологическую задачу утилизации вторичных ресурсов пищевой промышленности, но и создать дополнительную ценность за счет производства пищевых добавок, востребованных при изготовлении пищевых продуктов. Такой подход соответствует современным концепциям безотходных и ресурсосберегающих технологий, направленных на повышение эффективности агропромышленного комплекса.

Цель исследования – разработка технологических режимов получения целлюлозы и гемицеллюлоз из депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома, соответствующих по своим показателям качества требованиям действующей нормативной документации – ГОСТ и ТР ТС.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи:

– изучить влияние обработки депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома растворами гидроксида натрия на эффективность извлечения гемицеллюлоз;

- оценить влияние кратности промывки осадка гемицеллюлоз на содержание в нем целевых веществ и золы;
- определить влияние обработки целлюлозосодержащего концентрата растворами соляной кислоты на эффективность очистки целлюлозы;
- установить соответствие органолептических и физико-химических показателей качества полученных целлюлозы и гемицеллюлоз требованиям действующей нормативной документации – ГОСТ и ТР ТС.

Из-за высокого содержания пектиновых веществ технология извлечения целлюлозы и гемицеллюлоз из свекловичного жома включает больше стадий, чем при работе с традиционным сырьем. Несмотря на это, его комплексная переработка позволяет получить широкий спектр ценных продуктов – пищевые добавки.

За основу рационального получения целлюлозы и гемицеллюлоз из свекловичного жома была принята структурная схема, приведенная на рисунке 1.

### Объекты и методы исследования

Объекты исследования – делигнифицированный депектинизированный свекловичный жом (ДДСЖ) и получаемые из него целлюлоза и гемицеллюлозы.

Прессованный свекловичный жом производства ООО «Павловский сахарный завод» (Краснодарский край, Россия) использовали для получения ДДСЖ в соответствии с ранее апробированными технологическими режимами.

Вначале проводили депектинизацию прессованного свекловичного жома, далее измельчали и просеивали,

затем получали фракцию с размером частиц менее 2 мм. Параллельно с измельчением жома готовили экстрагент, подкисляя дистиллированную воду до значения pH 3,0 соляным буфером – водным раствором с содержанием соляной кислоты (HCl) 2,5 % и хлорида натрия (NaCl) 2,5 %. На следующем этапе проводили извлечение пектина при соотношении жом:экстрагент, равном 1:4, температуре 55 °C и постоянном перемешивании с частотой 2 с<sup>-1</sup> в течение 3 ч. Далее пектинсодержащий экстракт отделяли фильтрованием, депектинизированный свекловичный жом прессовали на ручном лабораторном винтовом прессе при постоянном усилии (моменте кручения). Пектинсодержащий экстракт смешивали с жомопрессовой водой, после чего утилизировали, т. к. выделение пектина не являлось целью данной работы.

Вслед за этим осуществляли делигнификацию депектинизированного свекловичного жома. Для этого его смешивали с 2 % раствором перекиси водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) в соотношении 1:4 при температуре 25 °C и постоянном перемешивании с частотой 2 с<sup>-1</sup> в течение 3,5 ч. Водную фазу отделяли фильтрованием, а ДДСЖ прессовали на ручном лабораторном винтовом прессе при постоянном усилии (моменте кручения). Затем жомопрессовую воду объединяли с водной фазой. Полученную водную фазу утилизировали.

Для оценки влияния обработки ДДСЖ гидроксидом натрия на экстракцию гемицеллюлоз предварительно определяли его биохимический состав. Материал разделяли на 9 равных частей для прове-

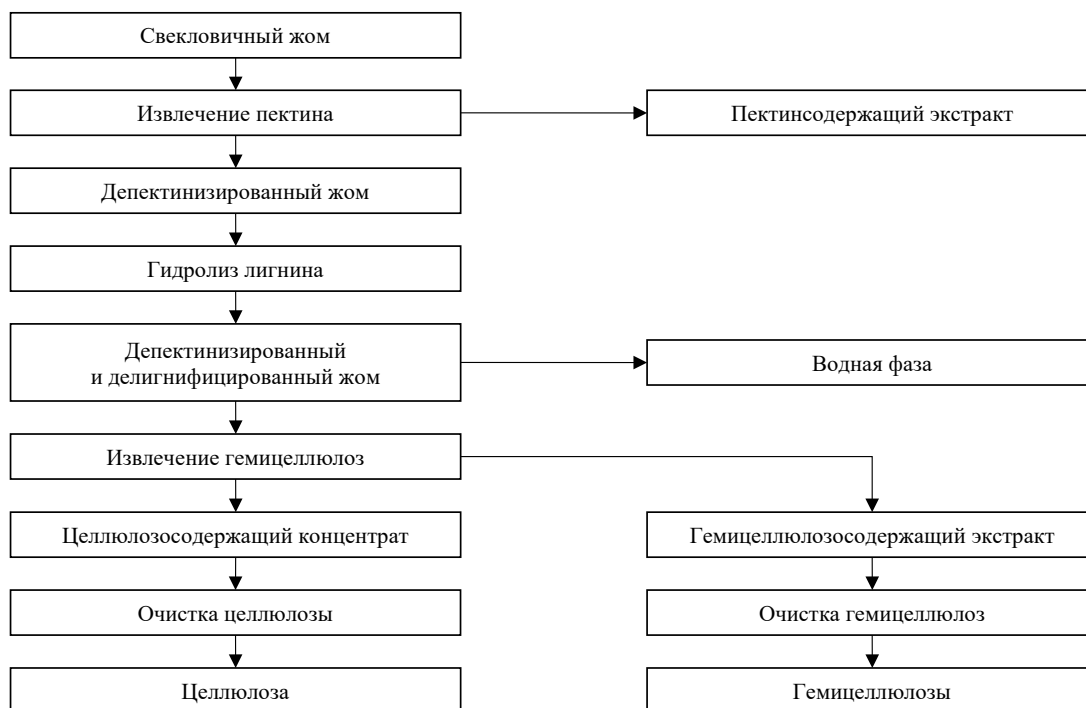


Рисунок 1. Структурная схема получения целлюлозы и гемицеллюлоз из свекловичного жома

Figure 1. Obtaining cellulose and hemicellulose from sugar beet pulp



дения экспериментов с варьированием концентрации щелочи и времени процесса. Предварительными исследованиями установлены и приняты в качестве постоянных факторов режимы, которые обеспечивают оптимальный гидродинамический режим в системе «ДДСЖ – раствор гидроксида натрия»: температура процесса 25 °С, соотношение компонентов 1:4 и частота перемешивания 2 с<sup>-1</sup>.

Переменными факторами выступали: концентрация гидроксида натрия ( $X_1$ ), %, в диапазоне 1–5 с шагом 2 и продолжительность процесса ( $Y_1$ ), мин, в диапазоне 60–180 с шагом 60.

Функциями отклика приняты показатели, %:  $Z_1$  – содержание гемицеллюлоз;  $Z_2$  – содержание пектина;  $Z_3$  – содержание редуцирующих веществ;  $Z_4$  – содержание азотистых веществ;  $Z_5$  – содержание золы.

После завершения экстракции гемицеллюлоз смесь фильтровали. Фильтрационный осадок представлял собой целлюлозосодержащий концентрат. В фильтрат (гемицеллюлозосодержащий экстракт) вносили 96 % этанол в количестве, вдвое превышающем его объем. Образовавшийся осадок гемицеллюлоз отделяли фильтрованием, промывали горячей (90–95 °С) дистиллированной водой (в том же соотношении 1:2 к исходному объему фильтрата) и высушивали. Высушенные образцы гемицеллюлоз отбирали для дальнейших исследований.

На втором этапе оценивали влияние числа промывок на содержание гемицеллюлоз и золы в осадке. Для этого осадок гемицеллюлоз делили на 9 проб: 1 исходную и 8 опытных. Исходную пробу не обрабатывали; опытные пробы промывали 70 % этанолом. Объем этанола для каждой промывки составлял 1/9 объема гемицеллюлозосодержащего экстракта, отобранного для анализа. Число промывок соответствовало порядковому номеру пробы. После завершения исследований в пробах определяли содержание гемицеллюлоз и золы.

На третьем этапе исследовали воздействие обработки целлюлозосодержащего концентрата растворами соляной кислоты на эффективность его очистки. Сначала полученный целлюлозосодержащий концентрат очищали от остатков гидроксида натрия, используемого для извлечения гемицеллюлоз. Для этого его смешивали с дистиллированной водой в соотношении 1:4 и доводили рН смеси до 7, добавляя 2 % раствор соляной кислоты. После смесь фильтровали; нейтрализованный целлюлозосодержащий концентрат (НЦК) использовали для исследований.

Предварительными исследованиями установлены и приняты в качестве постоянных следующие факторы, обеспечивающие оптимальный гидродинамический режим в системе «НЦК – раствор соляной кислоты»: температура процесса 60 °С; соотношение НЦК к раствору кислоты 1:4 и частота перемешивания 2 с<sup>-1</sup>.

В качестве переменных факторов рассматривали: концентрацию соляной кислоты ( $X_2$ ), %, в диапазоне

10–20 с шагом 5 и продолжительность процесса ( $Y_2$ ), мин, в диапазоне 60–300 с шагом 120.

В качестве функций отклика приняты, %:  $Z_6$  – содержание целлюлозы;  $Z_7$  – содержание пектиновых веществ;  $Z_8$  – содержание лигнина;  $Z_9$  – содержание азотистых веществ;  $Z_{10}$  – содержание золы.

На четвертом этапе исследовали органолептические и физико-химические показатели качества получаемых целлюлозы и гемицеллюлоз.

Анализ химического состава ДДСЖ и получаемых из него целлюлозы и гемицеллюлоз проводили согласно общепринятым методам: массовую долю влаги определяли по ГОСТ 28561-90; массовую долю золы – по ГОСТ 25555.491; массовую долю белка – по ГОСТ 26889-86; массовую долю пектиновых веществ – по ГОСТ 29059-91; массовую долю целлюлозы и гемицеллюлоз – по методике А. И. Ермакова [40]; массовую долю лигнина – по ГОСТ 26177-84. Массовую долю пищевых волокон рассчитывали как сумму показателей массовой доли пектина, протопектина, лигнина, гемицеллюлоз и целлюлозы.

Анализ органолептических и физико-химических показателей качества целлюлозы осуществляли в сравнении с требованиями ГОСТ 32770-2014, гемицеллюлоз – в сравнении с требованиями ГОСТ 33310-2015.

Опыты проводили в двух повторениях, полученные данные усредняли. Диапазон допустимых значений содержания компонентов в ДДСЖ и получаемых из него продуктах рассчитывали на основе среднеквадратичных отклонений. Если величина среднеквадратичного отклонения не превышала погрешность метода анализа, то в качестве отклонения использовали значения этой погрешности.

Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли с помощью программ Microsoft Office Excel 2019 и Statsoft Statistica 13.5.

### Результаты и их обсуждение

В таблице 1 приведен химический состав делигнифицированного свекловичного жома (ДДСЖ), полученного по ранее разработанной технологии.

Таблица 1. Химический состав делигнифицированного свекловичного жома, % к массе сухих веществ

Table 1. Chemical composition of delignified sugar beet pulp, % solids

Показатель	Значение
Целлюлоза	49,61 ± 2,48
Гемицеллюлозы	31,18 ± 1,56
Балластные вещества, в т. ч.:	19,21
протопектин	3,29 ± 0,16
пектин	1,32 ± 0,07
лигнин	0,12 ± 0,01
Азотистые вещества, в т. ч.:	6,58
белкового происхождения	3,95 ± 0,20
небелкового происхождения	2,63 ± 0,13
Зола	7,90 ± 0,39

Наиболее эффективным способом извлечения гемицеллюлоз из растительного сырья является щелочная экстракция, позволяющая выделить гемицеллюлозы в форме солей с минимальным переходом балластных веществ в экстракт. На данном этапе извлечение гемицеллюлоз проводили из ДДСЖ, где количество балластных компонентов минимально.

Учитывая это, концентрация щелочи в экстрагенте должна быть достаточно низкой для обеспечения контролируемого процесса. Для перехода гемицеллюлоз в нерастворимое состояние необходимо протекание

реакций щелочи с карбоксильными и фенольными группами гемицеллюлоз. Одновременно с этими реакциями протекают реакции щелочи с ацетильными группами, что наоборот повышает растворимость гемицеллюлоз в воде.

Для выявления концентрации гидроксида натрия и продолжительности процесса при обработке ДДСЖ на химический состав гемицеллюлоз проведены исследования с последующей математической обработкой данных. В результате получены квадратичные зависимости (рис. 2).

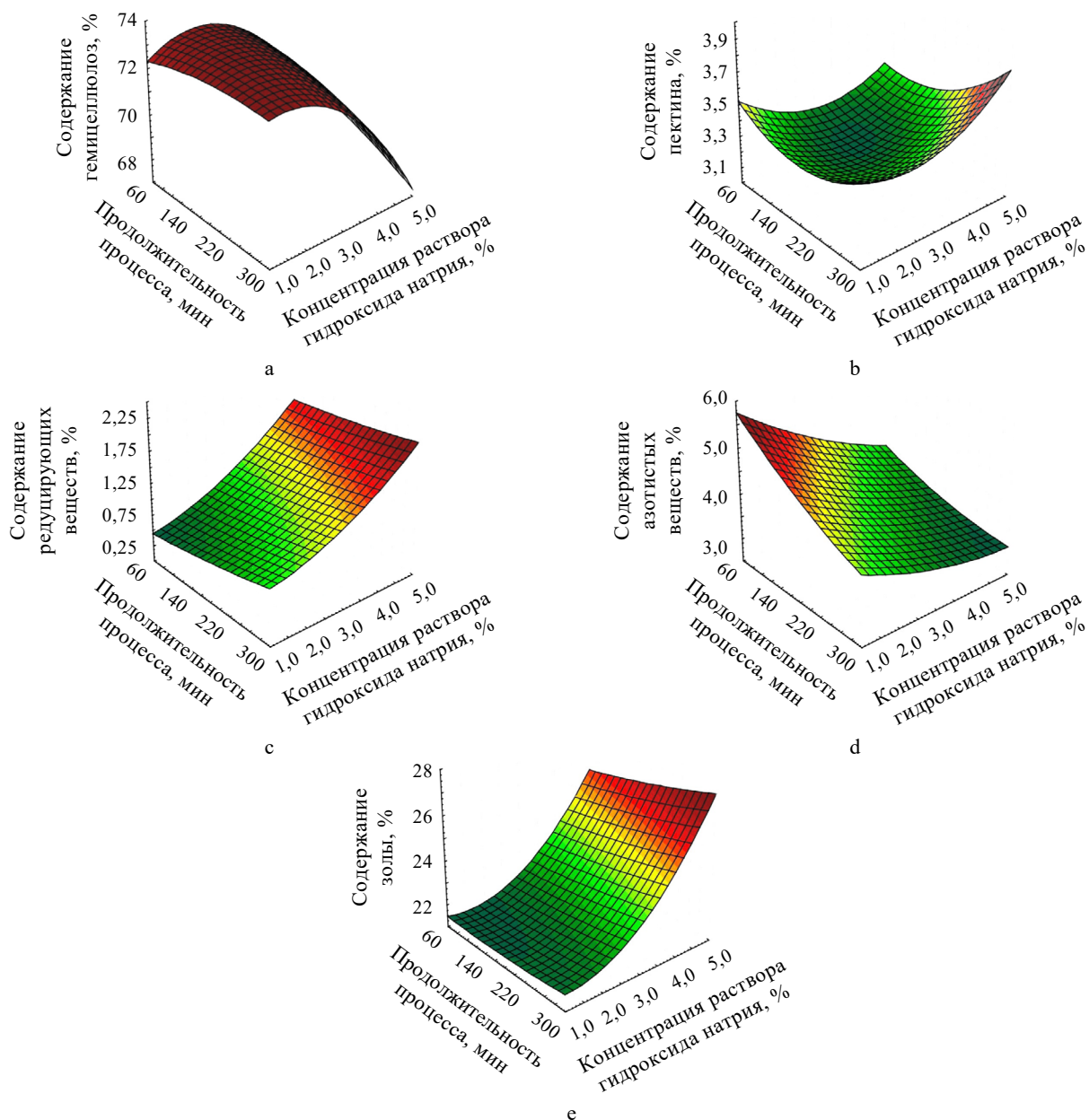


Рисунок 2. Влияние концентрации гидроксида натрия и продолжительности процесса при обработке ДДСЖ на химический состав гемицеллюлоз: а – содержание гемицеллюлоз; б – содержание пектина; с – содержание редуцирующих веществ; д – содержание азотистых веществ; е – содержание золы

Figure 2. Effect of sodium hydroxide concentration and process time on chemical composition of hemicellulose: а – hemicellulose; б – pectin; с – reducing substances; д – nitrogenous substances; and е – ash content

Анализ рисунка 2а показал, что максимальное содержание гемицеллюлоз наблюдается в диапазоне концентрации раствора гидроксида натрия 1,5–3,0 %. При концентрации менее 1,5 % образование нерастворимых солей гемицеллюлоз и их выделение в осадок протекало неинтенсивно; при концентрации более 3,0 %, наряду с образованием нерастворимых солей, происходил щелочной гидролиз гемицеллюлоз.

По результатам математической обработки экспериментальных данных получено уравнение (1), описывающее влияние концентраций гидроксида натрия и продолжительности процесса при обработке ДДСЖ на содержание гемицеллюлоз:

$$Z_1 = 70,03 + 2,14 \times X_1 + 0,014 \times Y_1 - 0,46 \times X_1^2 - 0,003 \times X_1 \times Y_1 - 2,13 \times 10^{-5} \times Y_1^2 \quad (1)$$

Для оценки адекватности полученного уравнения проведен анализ качества аппроксимации, проверка статистической значимости коэффициентов и верификация статистических предпосылок.

Коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,988, что свидетельствует о высоком соответствии модели экспериментальным данным. Скорректированный коэффициент детерминации  $R^2_{\text{корр}}$  соответствовал 0,967, что также подтверждает адекватность модели. В таблице 2 приведена статистическая значимость коэффициентов уравнения (1).

Из данных, представленных в таблице 2, следует, что наиболее существенное влияние на выходную переменную оказывают факторы  $X_1$ ;  $X_1^2$  и  $X_1 \times Y_1$ . Вклад факторов  $Y_1$  и  $Y_1^2$  статистически незначим. Однако их исключение из модели для упрощения приводило к существенному снижению значений коэффициента детерминации и скорректированного коэффициента детерминации, поэтому в итоговом уравнении эти факторы сохранены.

По результатам расчета  $F$ -критерия Фишера, составившего 47,46 при  $p = 0,0047$ , установлено, что совокупное влияние факторов статистически значимо. Полученные данные позволяют признать математическое уравнение адекватным.

Оптимизация уравнения 1 показала, что максимальное содержание гемицеллюлоз, составляющее 70,27 %,

обеспечивается при концентрации гидроксида натрия 1,61 % и продолжительности процесса 3,55 ч.

Анализ рисунка 2б свидетельствует, что совместно с гемицеллюлозами из ДДСЖ извлекается и пектин. Оба соединения являются гидроколлоидами, и механизм их извлечения идентичный. При этом максимальное количество пектина извлекается в диапазоне концентрации гидроксида натрия 2,0–4,0 %. При концентрации менее 1,5 % образование нерастворимых солей пектина и их выделение в осадок протекает неинтенсивно; при концентрации более 4,0 %, наряду с образованием нерастворимых солей, происходит щелочной гидролиз пектина.

По результатам математической обработки экспериментальных данных получено уравнение (2), описывающее влияние концентрации гидроксида натрия и продолжительности процесса при обработке ДДСЖ на содержание пектина:

$$Z_2 = 3,99 + 0,33 \times X_1 + 0,004 \times Y_1 - 0,044 \times X_1^2 - 0,0004 \times X_1 \times Y_1 - 1,04 \times 10^{-5} \times Y_1^2 \quad (2)$$

Для оценки качества полученного уравнения проведена оценка качества аппроксимации, статистической значимости коэффициентов и проверка статистических предпосылок.

Коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,863, что свидетельствует о соответствии модели экспериментальным данным. Скорректированный коэффициент детерминации равный 0,634 указывает на среднее качество аппроксимации.

В таблице 3 приведена статистическая значимость коэффициентов уравнения (2).

Данные таблицы 3 показывают, что наибольшее влияние на выходную переменную оказывают факторы  $X_1$  и  $X_1^2$ . Вклад факторов  $X_1 \times Y_1$ ;  $Y_1$  и  $Y_1^2$  статистически незначим. Но их исключение из модели для упрощения приводило к существенному снижению значений коэффициента детерминации, поэтому в итоговом уравнении эти факторы сохранены.

Расчет  $F$ -критерия Фишера, который составлял 3,77 при  $p = 0,152$ , показал, что модель не является статистически значимой на уровне 5 %. Следовательно, математическое уравнение нельзя признать адекват-

Таблица 2. Статистическая значимость коэффициентов уравнения (1)

Table 2. Statistical significance of coefficients: Equation (1)

Переменная	Коэффициент	$t$ -статистика	$p$ -значение	Интерпретация
Константа	70,03	79,31	0,00	значима
$X_1$	2,14	4,57	0,02	значима
$Y_1$	0,014	1,84	0,163	незначима
$X_1^2$	-0,46	-6,30	0,008	значима
$X_1 \times Y_1$	-0,003	-3,46	0,041	значима
$Y_1^2$	$-2,13 \times 10^{-5}$	-1,06	0,368	незначима

Таблица 3. Статистическая значимость коэффициентов уравнения (2)

Table 3. Statistical significance of coefficients: Equation (2)

Переменная	Коэффициент	<i>t</i> -статистика	<i>p</i> -значение	Интерпретация
Константа	3,99	17,10	0,00	значима
$X_1$	-0,33	-2,62	0,079	погранично значима (при $\alpha = 0,1$ )
$Y_1$	-0,004	-2,01	0,139	незначима
$X_1^2$	0,044	2,28	0,107	погранично значима
$X_1 \times Y_1$	0,0004	1,89	0,155	незначима
$Y_1^2$	$1,04 \times 10^{-5}$	1,96	0,145	незначима

ным, несмотря на наличие относительно высокого коэффициента детерминации.

Процесс попутного извлечения пектина при щелочном извлечении гемицеллюлоз требует проведения более глубоких исследований. Для получения гемицеллюлоз высокой чистоты из свекловичного жома на ранней стадии необходимо добиться максимального удаления сопутствующих гемицеллюлозе гидроколлоидов, чтобы их остаточное содержание в ДДСЖ было минимальным.

Из рисунка 2с видно, что с ростом концентрации раствора гидроксида натрия и продолжительности процесса повышается содержание редуцирующих веществ и снижается содержание гемицеллюлоз. Эта обратная зависимость подтверждает предположение о гидролизе гемицеллюлоз.

Согласно данным, которые представлены на рисунке 2(d, e), с увеличением концентрации раствора гидроксида натрия и продолжительности обработки содержание азотистых веществ снижается, в то время как содержание золы увеличивается. Это обусловлено щелочным разложением азотистых веществ и образованием нерастворимых солей из продуктов щелочного гидролиза гемицеллюлоз, пектина, редуцирующих веществ и азотистых веществ.

В связи с непостоянным химическим составом получаемого в производственных условиях свекловичного жома, в качестве рациональных параметров извлечения гемицеллюлоз и ДДСЖ приняты: концентрация раствора гидроксида натрия 2,0 %; продолжительность процесса 3,0 ч; температура 25 °С.

По указанным технологическим режимам получены гемицеллюлозы, химический состав которых приведен в таблице 4.

Суммарное содержание целевых компонентов (гемицеллюлоз, пектина и редуцирующих веществ) в полученном продукте составляет 74,0 %, что формально соответствует минимальному требованию ГОСТ 33310-2015 для содержания углеводов (более 74,0 %). Однако для обеспечения стабильного соответствия стандарту и повышения чистоты продукта необходимо увеличить долю гемицеллюлоз. Основной примесью, снижающей чистоту продукта, является зола, поэтому для повышения содержания гемицеллюлоз выше 74,0 %

Таблица 4. Химический состав гемицеллюлоз, % к массе сухих веществ

Table 4. Chemical composition of hemicellulose, % solids

Показатель	Значение
Гемицеллюлозы	$69,40 \pm 3,47$
Балластные вещества, в т. ч.:	30,60
пектин	$3,80 \pm 0,20$
редуцирующие вещества	$0,80 \pm 0,05$
Азотистые вещества, в т. ч.:	4,57
белкового происхождения	$3,00 \pm 0,10$
небелкового происхождения	$1,55 \pm 0,10$
Зола	$21,45 \pm 1,00$

необходимо снизить зольность продукта. Для этого возможно использование диализа, ионного обмена, ультрафильтрации, промывания спиртом и водой. Наиболее аппаратуро- и ресурсоемким методом выступает промывание спиртом. В связи с этим изучено влияние кратности промывки фильтрационного осадка, полученного после осаждения гемицеллюлоз из экстракта, на их конечное содержание и зольность.

На рисунке 3 представлены графики влияния кратности промывки фильтрационного осадка на содержание гемицеллюлоз и золы. Из представленных данных следует, что содержание гемицеллюлоз выше 74,0 % обеспечивается при двукратной промывке 70 % этанолом. Полученный целлюлозосодержащий концентрат нейтрализовали и использовали в дальнейших исследованиях.

В таблице 5 приведен химический состав нейтрализованного целлюлозосодержащего концентрата (НЦК). Анализ данных показывает, что для получения целлюлозы из НЦК необходимо удалить балластные вещества, доля органических соединений которых составляет около 80 %. Для очистки целлюлозы от подобных веществ наиболее эффективно применяют растворы соляной кислоты, поскольку она не нарушает структуру целлюлозных волокон.

Цель данного этапа работы заключалась в определении влияния концентрации соляной кислоты и продолжительности обработки НЦК на химический состав получаемой целлюлозы. Исследования включали мате-



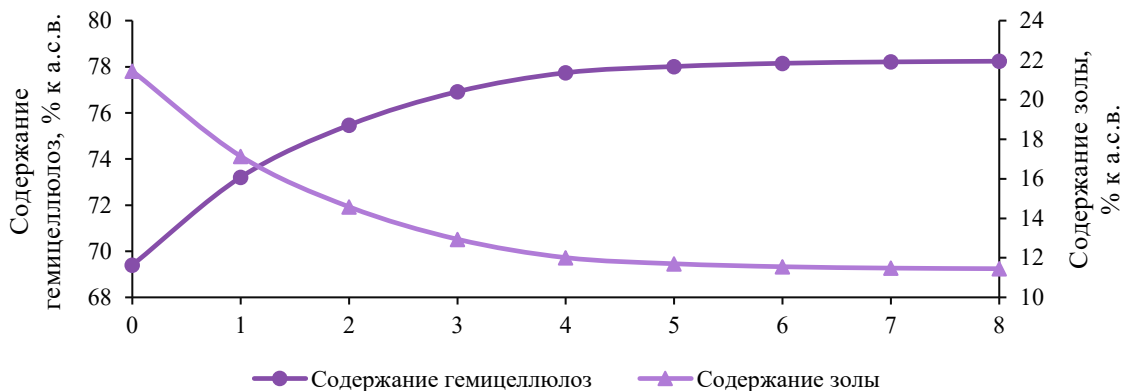


Рисунок 3. Влияние кратности промывки фильтрационного осадка на содержание гемицеллюлоз и золы

Figure 3. Effect of filter cake washing frequency on hemicellulose and ash

Таблица 5. Химический состав нейтрализованного целлюлозосодержащего концентрата, % к массе сухих веществ

Table 5. Chemical composition of neutralized cellulose concentrate, % solids

Показатель	Значение
Целлюлоза	78,70 ± 3,90
Балластные вещества, в т. ч.:	21,30
гемицеллюлозы	7,35 ± 0,37
пектиновые вещества	4,83 ± 0,24
лигнин	0,35 ± 0,05
Азотистые вещества, в т. ч.:	7,70
белкового происхождения	4,55 ± 0,10
небелкового происхождения	3,15 ± 0,10
Зола	1,07 ± 0,05

математическую обработку данных, в результате которой получены квадратические зависимости, представленные на рисунке 4. Анализ рисунка 4а показывает, что с повышением концентрации раствора соляной кислоты и продолжительности процесса содержание целлюлозы пропорционально возрастает. Для достижения требуемой ГОСТ 32770-2014 чистоты целлюлозы в порошке не менее 92,0 % необходимо подобрать оптимальные значения этих двух параметров.

По результатам математической обработки экспериментальных данных получено уравнение (3), описывающее влияние концентрации раствора соляной кислоты и продолжительности процесса при обработке НЦК на содержание целлюлозы:

$$Z_6 = 69,78 + 1,05 \times X_2 + 0,024 \times Y_2 - 0,0067 \times X_2^2 + 0,0012 \times X_2 \times Y_2 - 4,8 \times 10^{-5} \times Y_2^2 \quad (3)$$

Качество полученного уравнения оценивали по точности аппроксимации, статистической значимости коэффициентов и выполнению статистических предположений.

Коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,999, что указывает на высокую точность соответствия модели экспериментальным данным. Скорректированный коэффициент детерминации  $R^2_{\text{корр.}} = 0,997$ , что свидетельствует о высокой адекватности модели.

В таблице 6 приведена статистическая значимость коэффициентов уравнения (3). Наибольшее влияние на выходную переменную оказывают факторы  $X_2$ ,  $Y_2$  и  $X_1 \times Y_1$ . Вклад фактора  $X_1^2$  статистически незначим; вклад фактора  $Y_2^2$  – погранично значим. Редукция модели за счет их исключения приводила к существенному снижению коэффициентов детерминации ( $R^2$ ;  $R^2_{\text{корр.}}$ ), поэтому в конечном уравнении эти факторы сохранены.

Рассчитанное значение  $F$ -критерия Фишера составило 466,9 при  $p = 0,000156$ , что свидетельствует о статистической значимости модели, подтверждая ее адекватность.

Для оптимизации процесса по уравнению (3) в качестве ограничений заданы: содержание целлюлозы не менее 92,01 % (по ГОСТ 32770-2014), концентрация соляной кислоты в диапазоне 10–20 % с шагом 2,5 %; продолжительность процесса – от 60 до 300 мин (в соответствии с экспериментальным планом).

Решение задачи оптимизации показало, что требуемая чистота целлюлозы (92,01 %) достигается при концентрациях соляной кислоты 15,0; 17,5 и 20,0 % с продолжительностью процесса 284; 162 и 94 мин соответственно. При концентрациях 10,0 и 12,5 % в заданном временном интервале решений не найдено. Дополнительный анализ выявил теоретический минимум расхода реагента: концентрация 14,23 % при времени обработки 7,06 ч. С экономической точки зрения из практически реализуемых вариантов оптимальными выбраны параметры: концентрация соляной кислоты 15,0 % и время 4,74 ч.

Содержание пектиновых и азотистых веществ снижается с увеличением концентрации раствора соляной кислоты и продолжительности обработки

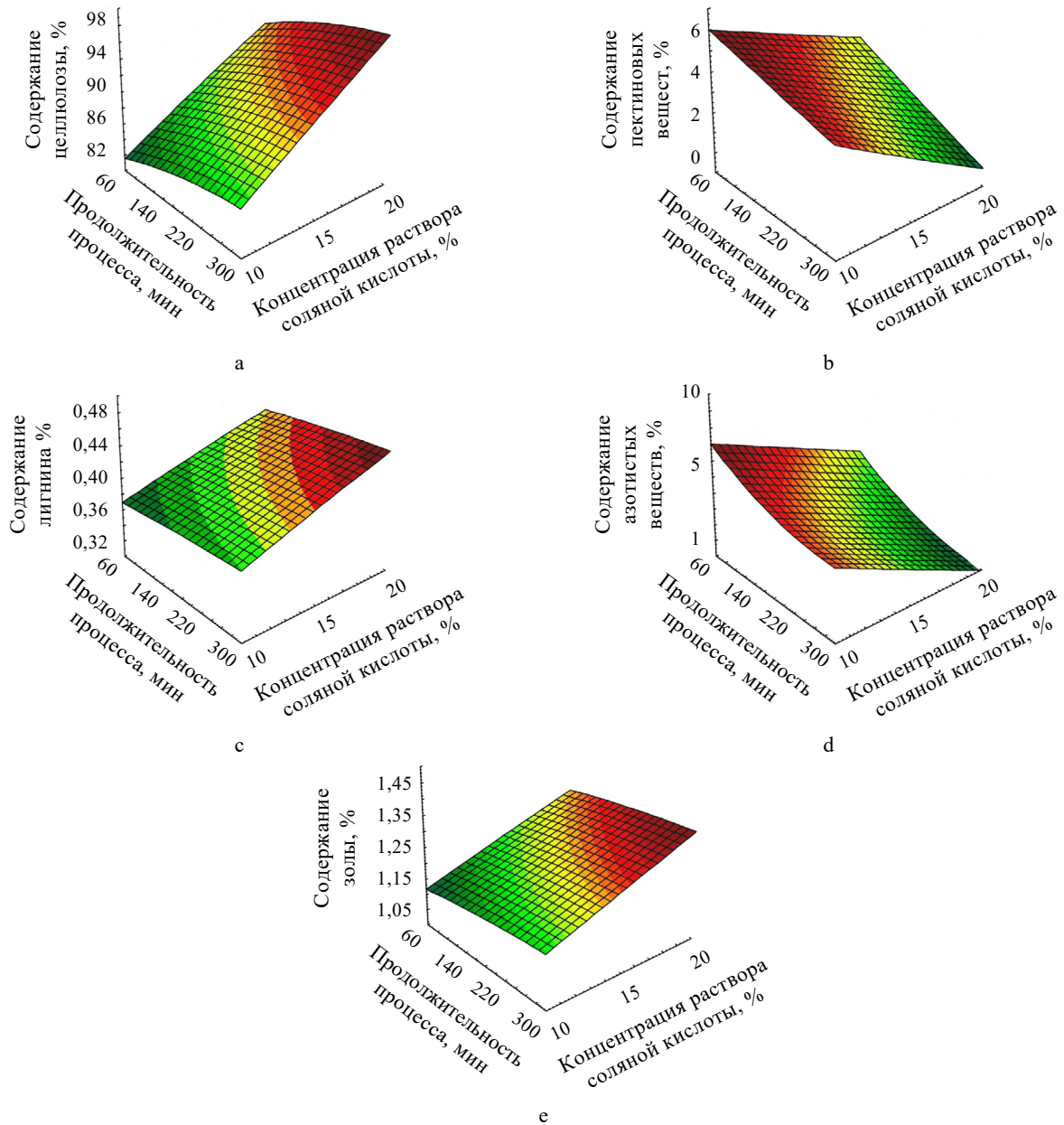


Рисунок 4. Влияние концентрации соляной кислоты и продолжительности процесса при обработке НЦК на химический состав целлюлозы: а – содержание целлюлозы; б – содержание пектиновых веществ; с – содержание лигнина; д – содержание азотистых веществ; е – содержание золы

Figure 4. Effect of hydrochloric acid concentration and processing time on chemical composition of cellulose: a – cellulose; b – pectin; c – lignin; d – nitrogenous substances; and e – ash

Таблица 6. Статистическая значимость коэффициентов уравнения (3)

Table 6. Statistical significance of coefficients: Equation (3)

Переменная	Коэффициент	<i>t</i> -статистика	<i>p</i> -значение	Интерпретация
Константа	69,78	33,79	0,00	значима
$X_2$	1,05	3,85	0,031	значима
$Y_2$	0,024	3,44	0,041	значима
$X_2^2$	-0,0067	-0,75	0,508	незначима
$X_2 \times Y_2$	0,0012	4,76	0,018	значима
$Y_2^2$	$-4,8 \times 10^{-5}$	-3,11	0,053	погранично значима

(рис. 4b, d), что подтверждает эффективность соляной кислоты для гидролиза балластных компонентов НЦК.

С повышением концентрации раствора соляной кислоты и продолжительности процесса пропорционально повышается содержание лигнина и золы (рис. 4с, е). Графики имеют незначительный положительный наклон, так как содержание лигнина и золы повышается за счет увеличения их доли в химическом составе целлюлозы. Гидролиз лигнина протекает медленнее; зольность увеличивается за счет образования нерастворимых солей. Однако основной причиной роста их процентного содержания является быстрое удаление пектинов и азотистых веществ, что приводит к относительному концентрированию лигнина и золы в оставшейся массе продукта.

Таким образом, в качестве рациональных режимов очистки НЦК были приняты: концентрация раствора соляной кислоты 15,0 %; продолжительность 5,0 ч; температура 60 °С.

Для оценки корректности всей разработанной технологической схемы получены целлюлоза и гемицеллюлозы; исследованы их органолептические и физико-химические показатели качества в сравнении с требованиями ГОСТ 32770-2014 для целлюлозы в порошке Е460 (ii) и ГОСТ 33310-2015 для гемицеллюлоз сои Е426 (табл. 7).

Целлюлоза и гемицеллюлозы, полученные по разработанной технологии, не соответствуют требованиям ГОСТ по признаку сырьевого происхождения. Требования ГОСТ 32770-2014 и ГОСТ 33310-2015 регламентируют незначительное количество показателей для пищевых добавок, которые используют в качестве эмульгаторов и загустителей, поэтому оценивать возможность применения свекловичных целлюлозы и гемицеллюлоз только по требованиям стандартов нерационально.

Более подробным нормативным документом с точки зрения предъявляемых требований к качеству пищевых добавок является Регламент № 231/2012 Европейской комиссии, устанавливающий спецификации для пищевых добавок, указанных в приложениях II и III к Регламенту (ЕС) 1333/2008 Европейского парламента и Совета ЕС (в редакции от 27 апреля 2025 г.). Данный

регламент предъявляет ряд показателей к гемицеллюлозам сои Е426 и порошковой целлюлозе Е460 (ii), которые отсутствуют в ГОСТ 32770-2014 и ГОСТ 33310-2015, ТР ТС 021/2011 и ТР ТС 029/2012.

Регламент № 231/2012 не предъявляет требований к происхождению порошкообразной целлюлозы – она может быть получена из любого волокнистого растительного материала. В требованиях к качеству целлюлозы обозначены: минимальный размер частиц, растворимость, тест суспензии, значение pH суспензии, потери при сушке, содержание водорастворимых примесей, сульфатной золы, крахмала.

ТР ТС Регламент № 231/2012, аналогично ГОСТ 33310-2015, в качестве сырья для гемицеллюлоз предполагает исключительно сою, а в качестве осадителя допускает только этанол. В требованиях к качеству гемицеллюлоз обозначены: растворимость, значение pH 1 % раствора, потери при сушке, содержание белка, вязкость 10 % раствора, содержание золы и этанола.

Наряду с ТР ТС 029/2012 Регламент № 231/2012 устанавливает предельно допустимые уровни содержания мышьяка, свинца, ртути и кадмия; микробиологические показатели безопасности в целлюлозе и гемицеллюлозах. При этом он не содержит требований к содержанию цезия-137 и стронция-90, уровни которых в ЕС регулируются отдельными радиационными актами и международными стандартами.

Проведенный комплекс исследований позволяет сделать вывод о возможности получения целлюлозы и гемицеллюлоз из свекловичного жома, соответствующих по своим органолептическим и физико-химическим показателям требованиям ГОСТ.

Для практического применения свекловичных целлюлозы и гемицеллюлоз в качестве пищевых добавок необходимы дополнительные исследования их ключевых технологических свойств: эмульгирующей и влагоудерживающей способности. Также требуется разработка и внедрение нормативной документации, устанавливающей требования к качеству и безопасности свекловичных целлюлозы и гемицеллюлоз, которая бы учитывала как положения российского законодательства, так и отдельные показатели, регламентированные зарубежными нормативными актами.

Таблица 7. Органолептические и физико-химические показатели качества целлюлозы и гемицеллюлоз

Table 7. Sensory and physicochemical quality indicators of cellulose and hemicellulose

Показатель	Целлюлоза		Гемицеллюлозы	
	Характеристика / значение	Требования ГОСТ 32770-2014	Характеристика / значение	Требования ГОСТ 33310-2015
Внешний вид	сыпучий порошок	сыпучий порошок	сыпучий порошок	сыпучий порошок
Цвет	белый	белый	желто-белый	белый или желто-белый
Содержание целлюлозы, %	92,5	не менее 92,0	76,2	не менее 74,0
Происхождение	свекловичная	древесная или хлопковая	свекловичные	соевые

### Выводы

Проведенные исследования подтвердили перспективность применения депектинизированного и делигнифицированного свекловичного жома в качестве сырья для получения гемицеллюлоз и целлюлозы. Установлены эффективные режимы извлечения гемицеллюлоз: концентрация раствора гидроксида натрия – 2,0 %, продолжительность процесса 3,0 ч, температура 25 °С. Требуемая степень чистоты извлекаемых гемицеллюлоз обеспечивается при их последующей двукратной промывке от балластных веществ 70 % этанолом. Определены оптимальные параметры получения целлюлозы: концентрация раствора соляной кислоты 15,0 %, продолжительность процесса 5,0 ч, температура 60 °С.

Полученные продукты соответствуют требованиям ГОСТ по органолептическим и физико-химическим показателям. Однако для их применения в пищевой промышленности необходимо разработать нормативную документацию, устанавливающую требования к качеству и безопасности свекловичных гемицеллюлоз и целлюлоз.

### Критерии авторства

С. О. Семенихин – разработка концепции работы; постановка цели и задач исследования; руководство процессом выполнения этапов работы; интерпретация полученных экспериментальных данных и написание рукописи статьи. А. А. Фабрицкая и Н. М. Даишева – проведение экспериментальных исследований и первичная обработка полученных данных.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Contribution

S.O. Semenikhin developed the research concept, set the research objectives, supervised the project, interpreted the results, and wrote the manuscript. A.A. Fabritskaya and N.M. Daisheva conducted the experimental studies and processed the obtained data.

### Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

### Список литературы / References

1. Захарова Л. М., Абушахманова Л. В. Исследование технологических особенностей производства сливочного масла пониженной жирности. *Техника и технология пищевых производств*. 2019. Т. 49. № 2. С. 209–215. [Zakharova LM, Abushahmanova LV. Low-fat butter: Production and technological features. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(2):209–215. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-209-215>
2. Иванова Г. В., Чесноков Н. В., Елисеенко Т. Г. Многокомпонентные рецептуры для специального питания. *Вестник КрасГАУ*. 2013. № 4. С. 176–179. [Ivanova GV, Chesnokov NV, Eliseenko TG. Multicomponent formulations for special nutrition. *Bulletin KSAU*. 2013;(4):176–179. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/PZBNMD>
3. Галушина П. С. Применение пищевых волокон в производстве мясных продуктов. *Тенденции развития науки и образования*. 2023. № 7. С. 206–208. [Galushina PS. Dietary fiber in meat production. *Trends in Science and Education*. 2023;(7):206–208. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18411/trnio-11-2023-453>
4. Chen Y, Fu Q, Jin W, Shen W, Li J. Improving the quality of steamed rice bread using micro-cellulose as fillers: Effect of particle size. *Carbohydrate Polymers*. 2025;362:123663. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123663>
5. Ren Y, Linter BR, Foster TJ. Starch replacement in gluten free bread by cellulose and fibrillated cellulose. *Food Hydrocolloids*. 2020;107:105957. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105957>
6. Zhou L, Zhang W, Wang J. Recent advances in the study of modified cellulose in meat products: Modification method of cellulose, meat quality improvement and safety concern. *Trends in Food Science & Technology*. 2022;122:140–156. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.024>
7. Quijano L, Rodrigues R, Fischer D, Tovar-Castro JD, Payne A, et al. Bacterial cellulose cookbook: A systematic review on sustainable and cost-effective substrates. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2024;9(4):379–409. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2024.05.003>
8. Пулатов Д. И. Роль пищевых волокон в профилактике и лечении хронического запора. *Проблемы гастроэнтерологии*. 2022. № 1. С. 43–50. [Pulatov DI. Dietary fiber in prevention and treatment of chronic constipation. *Issues of Gastroenterology*. 2022;(1):43–50. (In Russ.)]
9. Prabsangob N. Plant-based cellulose nanomaterials for food products with lowered energy uptake and improved nutritional value—a review. *NFS Journal*. 2023; 31:39–49. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2023.03.002>
10. He L, Guan Q-Q, Peng L-C, Chen K-L, Chai X-S. Improvement of alkali efficiency for purification of dissolving pulp by a modified cold caustic extraction process. *Carbohydrate Polymers*. 2017;178:412–417. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.085>
11. Царева М. А. О строении гемицеллюлозной составляющей клеточных стенок плодовоовощного сырья. *Химия растительного сырья*. № 1. С. 35–52. [Tsareva MA. Hemicellulose structure of cell walls in fruit and vegetable raw materials. *Chemistry of plant raw materials*. 2022;(1):35–52. (In Russ.)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.2022019366>



12. Ottah VE, Ezugwu AL, Ezike TC, Chilaka FC. Comparative analysis of alkaline-extracted hemicelluloses from Beech, African rose and Agba woods using FTIR and HPLC. *Heliyon*. 2022;8(6):e09714. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09714>
13. Najjoun N, Grimi N, Benali M, Chadni M, Castignolles P. Extraction and chemical features of wood hemicelluloses: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;311(4):143681. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143681>
14. Kvikant M, Dax D, Toivakka M, Filonenko S, Xu C. Amphiphilic hemicellulose derivatives as stabilizers in oil-in-water emulsions. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;309(4):143094. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143094>
15. Li S, Duan Y, Fang J, Chen S, Wang J, Jiang H, *et al.* Soybean hull hemicellulose–soybean protein isolate composite aerogel: Adsorption material for remediation of heavy metal-polluted water. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;310(2):143298. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143298>
16. Иванов Ю. С., Никандров А. Б., Кузнецов А. Г. Производство сульфатной целлюлозы. Часть 1. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. 77 с. [Ivanov YuS, Nikandrov AB, Kuznetsov AG. Sulfate cellulose production. Part 1. St. Petersburg: Higher School of Technical Engineering, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 2017. 77 p. (In Russ.)]
17. Aldosari OF, Jabli M, Morad MH. Chemical extraction of cellulose from Ligno-cellulosic *Astragalus armatus* pods: Characterization, and application to the biosorption of methylene blue. *Arabian Journal of Chemistry*. 2023;16(6):105019. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105019>
18. Wardhono E, Kustiningsih I, Yustanti E, Kurniawan B, Sukamto D, *et al.* Enhanced cellulose extraction from delignified oil palm empty fruit bunches using sequential ultrasound-microwave processing. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2025;54:179–190. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.07.015>
19. Khan MN, Ahmad A, Rehman N, Kelestemur S, Tariq M, *et al.* Extraction and characterization of cellulose and cellulose nanocrystals from the stalks of *Marrubium vulgare* plant. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2025;11:100947. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100947>
20. Raza M, Abu-Jdayil B. Extraction of cellulose nanocrystals from date seeds using transition metal complex-assisted hydrochloric acid hydrolysis. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;294:139477. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139477>
21. Judith R-BD, Pámanes-Carrasco GA, Delgado E, Rodríguez-Rosales MDJ, Medrano-Roldán H, *et al.* Extraction optimization and molecular dynamic simulation of cellulose nanocrystals obtained from bean forage. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2022;43:102443. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102443>
22. Macarez A-C, Maalej H, Drobek M, Pochat-Bohatier C, Maalej A, *et al.* From olive stones waste to valuable resource: Exploring various techniques for cellulose extraction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025;13(5):118204. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118204>
23. Woldie WA, Shibeshi NT, Kuffi KD. Optimization of cellulose nanocrystals extraction from *teff* straw using acid hydrolysis followed by ultrasound sonication. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2025;9:100707. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100707>
24. Wulan PPDK, Ismojo, Khumaeroh, Syabila AN, Handayani AS, *et al.* Sustainable extraction of cellulose nanocrystals from empty palm oil bunches via low-acid hydrolysis. *Results in Engineering*. 2024;24:103012. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103012>
25. Bragagnolo FS, Santos PH, Funari CS, Rostagno MA, Exploring the potential of soy by-products: extraction strategies and bioactivity enhancement. *Current Opinion in Food Science*. 2025;64:101319. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2025.101319>
26. Hutterer C, Schild G, Potthast A. A precise study on effects that trigger alkaline hemicellulose extraction efficiency. *Bioresource Technology*. 2016;214:460–467. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.114>
27. Rodríguez-Sanz A, Fuciños C, Míguez M, Rúa ML, Torrado AM. Direct enzymatic hydrolysis of solid wheat straw with *endo*-xylanases: Effect of the temperature on the hemicellulose release and the product profile modulation. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;270(2):132211. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132211>
28. Djalal M, Nafissa M, Mansour R, Jawaid M, Hocine M, Lamia B. Effect of alkali treatment on new lignocellulosic fibres from the stem of the *Aster squamatus* plant. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;32:2882–2890. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.104>
29. Zhang J, Wang Y-H, Qu Y-S, Wei Q-Y, Li H-Q. Effect of the organizational difference of corn stalk on hemicellulose extraction and enzymatic hydrolysis. *Industrial Crops and Products*. 2018;112:698–704. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.007>
30. Wang X, Liu Y, Luo S, Liu B, Yao S, *et al.* Structural characteristics of hemicelluloses and lignin-carbohydrate complexes in alkaline-extracted bamboo green, core, and yellow. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2025;10(3):386–396. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2025.01.004>
31. Li H-Y, Sun S-N, Zhou X, Peng F, Sun R-C. Structural characterization of hemicelluloses and topochemical changes in *Eucalyptus* cell wall during alkali ethanol treatment. *Carbohydrate Polymers*. 2015;123:17–26. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.12.066>

32. Sun S-L, Wen J-L, Ma M-G, Sun R-C. Successive alkali extraction and structural characterization of hemicelluloses from sweet sorghum stem. *Carbohydrate Polymers*. 2013;92(2):2224–2231. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.098>
33. Грибкова И. Н., Харламова Л. Н., Севостианова Е. М., Лазарева И. В., Захаров М. А. и др. Извлечение органических соединений из отработанного пивного зерна различными методами. *Техника и технология пищевых производств*. 2022. Т. 52. № 3. С. 469–489. [Gribkova IN, Kharlamova LN, Sevostianova EM, Lazareva IV, Zakharov MA, *et al.* Extracting organic compounds from brewer's spent grain by various methods. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(3):469–489. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2383>
34. Sun S-C, Sun D, Cao X-F. Effect of integrated treatment on enhancing the enzymatic hydrolysis of cocksfoot grass and the structural characteristics of co-produced hemicelluloses. *Biotechnology for Biofuels*. 2021;14(88). <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01944-8>
35. Sabatini F, Maresca E, Aulitto M, Termopoli V, De Risi A, *et al.* Exploiting agri-food residues for kombucha tea and bacterial cellulose production. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;302:140293. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140293>
36. Донченко Л. В. Свекловичный жом – стабильный промышленный источник пектина в России. *Сахар*. 2018. № 7. С. 46–49. [Donchenko LV. Beet pulp as a reliable industrial source of pectin in Russia. *Sugar*. 2018;7:46–49. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/XWFGPB>
37. Донченко Л. В., Ластков Д. О. Об актуальности глубокой переработки свекловичного жома в современных условиях. *Сахар*. 2023. №2. С. 40–45. [Donchenko LV, Lastkov DO. Advanced deep processing of beet pulp. *Sugar*. 2023;2:40–45. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2023-2-40-45>
38. Abou-Elseoud WS, Hassan EA, Hassan ML. Extraction of pectin from sugar beet pulp by enzymatic and ultrasound-assisted treatments. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2021;2:100042. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100042>
39. Abou-Elseoud WS, Abdel-karim AM, Hassan EA, Hassan ML. Enzyme- and acid-extracted sugar beet pectin as green corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solution. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2021;2:100072. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100072>
40. Ермаков А. И. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агрпромиздат, 1987. 429 с. [Ermakov AI. *Biochemical methods in plant research*. Leningrad: Agropromizdat; 1987. 429 p (In Russ.)]

#### **Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors**

Семенихин Семен Олегович / Semyon O. Semenikhin ORCID 0000-0002-2038-0122; eLIBRARY SPIN 1048-7200  
Фабрицкая Алла Андреевна / Alla A. Fabritskaya ORCID 0000-0001-9310-4543; eLIBRARY SPIN 3317-0628  
Даишева Наиля Мидхатовна / Nailya M. Daisheva ORCID 0000-0002-5813-156X; eLIBRARY SPIN 4679-7994