

## ДВУХСТУПЕНЧАТЫЙ КИСЛОТНЫЙ ГИДРОЛИЗ ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК СОСНЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ МОНОСАХАРИДОВ

К.В. Саерова, Г.Ф. Илалова, Р.Р. Сафин✉

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ),  
Россия, 420015, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68

cfaby@mail.ru

Представлена технология переработки древесных опилок сосны для получения питательных сред на основе моносахаридов. Проведен сравнительный анализ эффективности серной, сернистой и ортофосфорной кислот в процессе кислотного гидролиза. Установлено, что наилучшие результаты достигаются при комбинировании кислот: первая ступень гидролиза в 3,5 % (мас. доля) растворе ортофосфорной кислоты (170 °C, 15 мин.) обеспечивает расщепление гемицеллюлозы, вторая — в 4 % (мас. доля) растворе сернистой кислоты (170 °C, 40 мин.) — гидролиз целлюлозного остатка. Показано, что суммарный выход редуцирующих веществ двухступенчатого гидролиза составляет 62,2 %, а максимальная концентрация глюкозы, определенная методом ВЭЖХ, достигает 29,25 г/л. Выявлено, что гидролизат обогащен фосфатами, что устраняет необходимость добавления источников фосфора при культивировании продуцента полигидроксibuтирата *Cupriavidus necator*. Сделан вывод о перспективности разработанного режима, соответствующего принципам зеленой химии, для создания технологий производства биоразлагаемых полимеров.

**Ключевые слова:** кислотный гидролиз, сернистая кислота, ортофосфорная кислота, древесные опилки, сосна, редуцирующие вещества, моносахариды, питательная среда

**Ссылка для цитирования:** Саерова К.В., Илалова Г.Ф., Сафин Р.Р. Двухступенчатый кислотный гидролиз древесных опилок сосны для получения питательных сред на основе моносахаридов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 5. С. 106–117. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-106-117

В условиях глобального перехода к устойчивому развитию и биоэкономике особое внимание уделяется разработке технологий переработки возобновляемых природных ресурсов, в первую очередь лигноцеллюлозной биомассы. Древесина как наиболее доступный и широко распространенный вид растительного сырья представляет собой сложную композитную структуру, состоящую из целлюлозы (40...50 %), гемицеллюлозы (20...35 %) и лигнина (15...30 %), а также небольших количеств экстрактивных веществ и минеральных компонентов [1–3]. Такая структура имеет высокую механическую прочность и обладает устойчивостью к биодegradации, хотя затрудняет доступ к полисахаридной фракции [4–6], которую можно использовать в качестве источника моносахаридов для получения биотоплива, биопластиков, пищевых добавок, а также питательных сред для микроорганизмов.

Одним из ключевых этапов в технологиях биопереработки древесины является гидролиз — процесс расщепления полисахаридов

до простых сахаров под действием воды, катализаторов и/или ферментов. Среди известных методов выделяют физические, химические, биологические и комбинированные подходы. Физические методы (измельчение, паровая или микроволновая предобработка) направлены на разрушение лигноцеллюлозного комплекса и увеличение доступности полисахаридов, но сами по себе не обеспечивают значительный выход редуцирующих веществ [7]. Биологический (ферментативный) гидролиз отличается высокой селективностью и экологичностью, однако для его проведения требуются длительное время, дорогостоящие ферментные препараты и предварительная предобработка сырья [8]. Наиболее технологичным и масштабируемым в настоящее время остается химический гидролиз, особенно с использованием разбавленных минеральных кислот [9].

Среди кислотных катализаторов наиболее распространены серная ( $H_2SO_4$ ) и сернистая ( $H_2SO_3$ ) кислоты. Серная кислота активно применяется благодаря своей высокой каталитической активности, доступности и низкой стоимости. Однако ее использование сопряжено с некоторыми недостатками. Образовавшиеся

моносахариды интенсивно разлагаются с образованием фурфурола, гидроксиметилфурфурола и других токсичных побочных продуктов [10, 11], что ограничивает применение гидролизата в биотехнологических целях. Сернистая кислота, в свою очередь, проявляет более мягкое действие, обеспечивая меньшее образование побочных соединений, что делает ее предпочтительнее для получения гидролизатов, пригодных в качестве питательных сред [12, 13].

Механизм кислотного гидролиза лигноцеллюлозной биомассы представляет собой многостадийный процесс, включающий в себя диффузию катализатора в структуру сырья, протонирование гликозидных связей, их разрыв с образованием олигосахаридов и последующую деполимеризацию до моносахаридов [14, 15]. Кинетика процесса описывается уравнениями псевдопервого порядка, где скорость реакции зависит от концентрации кислоты, температуры и доступности реакционных центров в полисахаридной матрице [16]. Исследования показывают, что применение разбавленных растворов кислот обеспечивает селективное расщепление гемицеллюлозной фракции с минимальной деструкцией образующихся пентоз и гексоз [17, 18].

Несмотря на очевидные преимущества, одноступенчатый гидролиз не позволяет эффективно использовать весь потенциал лигноцеллюлозного сырья. Гемицеллюлоза, имеющая аморфную и разветвленную структуру, легко гидролизруется даже при умеренных условиях, тогда как кристаллическая целлюлоза требует более жестких условий [19, 20]. При одновременном воздействии на обе фракции возникает компромисс: либо гемицеллюлоза интенсивно деградирует в побочные продукты, либо целлюлоза остается недостаточно расщепленной. Это приводит к снижению общего выхода целевых сахаров и обуславливает ухудшение качества гидролизата [21].

В 2020-е годы все большее внимание уделяется двухступенчатым режимам гидролиза, позволяющим раздельно обрабатывать легко- и трудногидролизуемые фракции древесины. Первая ступень направлена на расщепление аморфной гемицеллюлозы при относительно мягких условиях, а вторая — на гидролиз кристаллической целлюлозы при более жестких условиях [22–24]. Такой подход позволяет увеличить выход целевых продуктов за счет минимизации деградации сахаров. При этом между ступенями происходит удаление гидролизата, содержащего ценные сахара, и возможная замена катализатора, что открывает возможности для подбора состава конечного продукта.

В связи с этим особый интерес представляет возможность комбинирования различных кислот на разных стадиях процесса. Например, использование ортофосфорной кислоты ( $H_3PO_4$ ) на одной из ступеней позволяет не только эффективно гидролизовать древесину, но и внести в гидролизат необходимые минеральные компоненты (например, фосфаты), которые могут служить источником фосфора в питательных средах для микроорганизмов [25–27], таких как *Cupriavidus necator*, используемых для биосинтеза полигидроксibuтирата — биоразлагаемого полиэфира.

При этом оптимизация параметров двухступенчатого гидролиза представляет собой сложную многофакторную задачу. Концентрация кислоты, температура, продолжительность обработки и гидромодуль оказывают влияние на выход редуцирующих веществ и степень их деградации [28]. При низких концентрациях катализатора процесс протекает медленно и не обеспечивает полного расщепления полисахаридов, тогда как избыточная кислотность интенсифицирует побочные реакции дегидратации сахаров с образованием фурфурола и 5-гидроксиметилфурфурола, токсичных для последующей биоконверсии [29, 30].

Современные исследования в области двухступенчатого кислотного гидролиза направлены на разработку процессов и моделей, описывающих взаимосвязь между технологическими параметрами и выходом целевых продуктов [31, 32]. Разработанные модели позволяют прогнозировать оптимальные условия процесса для различных видов сырья, учитывая различия в химическом составе и надмолекулярной структуре лигноцеллюлозного комплекса. Особое внимание уделяется изучению влияния кристалличности целлюлозы на скорость ее гидролиза: аморфные области расщепляются на порядок быстрее кристаллических, что обуславливает необходимость дифференцированного подхода к обработке различных фракций древесины [33].

Применение ортофосфорной кислоты ( $H_3PO_4$ ) в комбинации с сернистой открывает дополнительные возможности для управления составом гидролизата. Обладая умеренной кислотностью и низкой окислительной способностью, эта кислота обеспечивает мягкий гидролиз гемицеллюлозы с сохранением структуры моносахаридов, а также способствует частичной модификации лигнина, что улучшает доступность целлюлозы на второй стадии гидролиза [34].

Сернистая кислота, образующаяся при расщеплении диоксида серы в воде, проявляет

высокую селективность к кристаллической целлюлозе и способствует сульфированию лигнина, что облегчает его последующее удаление или модификацию [35].

Таким образом, актуальным является подбор кислот и оптимальных условий гидролиза: времени и концентрации кислоты. Эти параметры оказывают прямое влияние как на кинетику процесса, так и на качество гидролизата. Например, увеличение концентрации кислоты может повысить скорость гидролиза, но при превышении определенного порога приводит к снижению выхода редуцирующих веществ вследствие их разложения [36]. Поиск компромиссных условий, обеспечивающих максимальный выход при минимальном образовании субпродуктов, остается важной научной и технологической задачей.

## Цель работы

Цель работы — разработка и оптимизация двухступенчатого режима кислотного гидролиза сосновых опилок для получения высококачественного гидролизата, пригодного в качестве питательной среды для биотехнологического производства биополимеров.

## Материалы и методы

В качестве исходного лигноцеллюлозного сырья использовались древесные опилки сосны, полученные в результате механической обработки древесины на деревообрабатывающем предприятии. Перед проведением экспериментов опилки доизмельчали до фракции 1...3 мм с помощью лабораторной мельницы и высушивали в сушильном шкафу при температуре 105...110 °С до постоянной массы.

В качестве гидролизующих агентов применялись следующие водные растворы:

- ортофосфорной кислоты ( $H_3PO_4$ , ЧДА,  $\geq 85\%$ , «Реахим», Россия), разбавленная до концентраций 3, 3,5 и 4 % (мас. доля);

- серная кислота ( $H_2SO_4$ , ЧДА,  $\geq 98\%$ , «Химреактив», Россия), разбавленная дистиллированной водой до концентраций 2, 3, 4 и 6 % (мас. доля);

- сернистая кислота ( $H_2SO_3$ ), приготовленная путем насыщения дистиллированной воды диоксидом серы ( $SO_2$ ) до заданной концентрации 2, 3, 4 и 6 % (мас. доля) [37].

Гидролиз проводили в лабораторном гидролизере капсульного типа с электронагревательной рубашкой (рис. 1). Капсулы объемом 30 мл изготавливались из нержавеющей стали марки 12X18H10T, устойчивой к коррозии в кислых



Рис. 1. Гидролизер капсульного типа с нагревательной рубашкой

Fig. 1. Capsule hydrolyzer with a heating jacket

средах при повышенных температурах. Температуру контролировали терморегулятором ТРМ-210.

Исследование кинетики процесса гидролиза проводили для двух режимов: одноступенчатого и двухступенчатого. Процесс одноступенчатого гидролиза осуществляли следующим образом: в каждую капсулу загружали 100 г абсолютно сухих опилок и добавляли заданный объем кислотного раствора (соотношение «твердое тело/жидкость» — 1:5,8). Запечатанные капсулы помещали в предварительно нагретую до 170 °С печь. Через каждые 10 мин. извлекали по одной капсуле с помощью специального термостойкого захвата и охлаждали под струей проточной воды до комнатной температуры (~20...25 °С) в течение 5...7 мин. для прекращения реакции. Далее определяли содержимое редуцирующих веществ в гидролизате.

При проведении двухступенчатого режима первую ступень выполняли аналогично одноступенчатому процессу. После завершения первой ступени гидролизат отделяли, а твердый остаток промывали дистиллированной водой, сушили при температуре 105...110 °С до постоянной массы и использовали как сырье для второй ступени.

Содержание редуцирующих сахаров в гидролизатах определяли титриметрическим

методом Бертрана в соответствии с методикой, описанной в работе [37]. Результаты выражали в миллиграммах редуцирующих веществ на грамм абсолютно сухого сырья, а также в процентах относительно массы сухого сырья.

Качественный и количественный состав моносахаридов (глюкозы, арабинозы, фруктозы) определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе PerkinElmer серии Flexar, оснащенный рефрактометрическим детектором и колонкой Aminex HPLC-87H (Bio-Rad).

## Результаты и обсуждение

Для выбора оптимального катализатора был проведен сравнительный анализ кинетики выхода редуцирующих веществ в процессе кислотного гидролиза в 6%-х (мас. доля) растворах серной ( $H_2SO_4$ ), сернистой ( $H_2SO_3$ ), и фосфорной ( $H_3PO_4$ ) кислот при 170 °C (рис. 2, табл. 1).

Анализ полученных результатов показывает принципиальные различия в эффективности применения различных кислот на разных стадиях процесса. В частности, серная кислота дает резкий скачок выхода редуцирующих веществ в первые же минуты процесса с последующей потерей ценных продуктов.

Сернистая кислота проявляет более умеренную активность: ее кривая показывает быстрый рост концентрации редуцирующих веществ с максимумом 3,49 % на 10-й минуте, за которым следует плавное снижение с последующим вторым подъемом к 90-й минуте (1,40 %). Такой двухфазный профиль свидетельствует о последовательном расщеплении гемицеллюлозы (первый пик) и начале гидролиза целлюлозы (второй подъем).

Фосфорная кислота, напротив, демонстрирует наиболее плавный и стабильный профиль кинетики: максимум концентрации редуцирующих веществ (3,25 %) достигается на 20-й минуте. При этом их потери к 30-й минуте составляют менее 0,1 %, что позволяет упростить регулирование процесса гидролиза гемицеллюлоз. Такая стабильность обусловлена умеренной каталитической активностью фосфорной кислоты  $H_3PO_4$  ( $pK_{a1} \approx 2,1$ ), обеспечивающей минимальную деградацию моносахаридов в фурфурол и гидроксиметилфурфурол. При этом если в случае серной и сернистой кислот после 60-й минуты снова наблюдается рост выхода редуцирующих веществ, обусловленный началом расщепления целлюлозы, то в случае фосфорной кислоты подобное не наблюдается, что характеризует слабую каталитическую активность данной

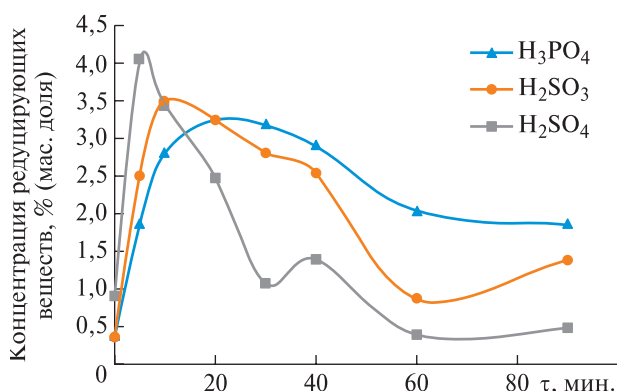


Рис. 2. Кинетика изменения концентрации редуцирующих веществ в гидролизате древесины сосны при температуре гидролиза 170 °C и концентрации соответствующей эксперименту кислоты 6 % (мас. доля)

Fig. 2. Kinetics of changes in the concentration of RVs in the hydrolysate of pine wood at a hydrolysis temperature of 170 °C and a concentration of 6 % (wt.) of the acid corresponding to the experiment

Т а б л и ц а 1

**Выход редуцирующих веществ при использовании растворов  $H_2SO_4$ ,  $H_2SO_3$ , и  $H_3PO_4$  в концентрации 6 % (мас. доля) при температуре 170 °C**

**Yield of reducing substances using 6 wt %  $H_2SO_4$ ,  $H_2SO_3$ , and  $H_3PO_4$  solutions at 170 °C**

| Время, мин. | $H_2SO_4$ , % | $H_2SO_3$ , % | $H_3PO_4$ , % |
|-------------|---------------|---------------|---------------|
| 0           | 0,91          | 0,38          | 0,4           |
| 5           | 4,05          | 2,51          | 1,85          |
| 10          | 3,44          | 3,49          | 2,8           |
| 20          | 2,48          | 3,24          | 3,25          |
| 30          | 1,09          | 2,82          | 3,17          |
| 40          | 1,40          | 2,53          | 2,9           |
| 60          | 0,41          | 0,88          | 2,05          |
| 90          | 0,49          | 1,40          | 1,87          |

кислоты для расщепления целлюлозы. Таким образом, данная кислота —  $H_3PO_4$  идеальна для первой ступени гидролиза, где требуется контролируемый процесс расщепления гемицеллюлоз с сохранением качества гидролизата.

С учетом выявленных различий в кинетике гидролиза и реакционной способности компонентов лигноцеллюлозы целесообразно оптимизировать двухступенчатый процесс следующим образом:

– первая ступень — мягкий гидролиз фосфорной кислотой ( $H_3PO_4$ ), направленный на извлечение легкодоступных аморфных фракций

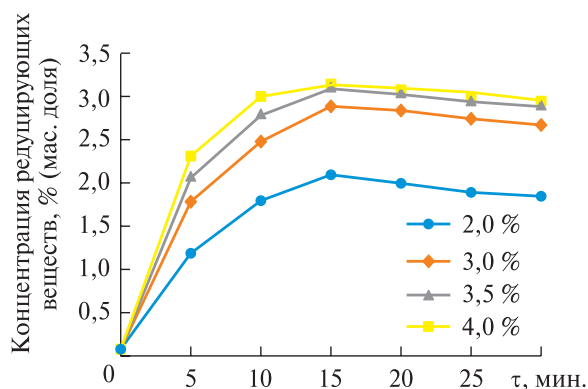


**Рис. 3.** Кинетика изменения концентрации редуцирующих веществ в гидролизате соснового опила в процессе гидролиза фосфорной кислотой при температуре 170 °C и концентрациях 2...4 % (мас. доля)

**Fig. 3.** Kinetics of changes in the concentration of reactive substances in the hydrolysate of pine sawdust during hydrolysis with orthophosphoric acid at 170 °C and concentrations of 2...4 % (wt.)

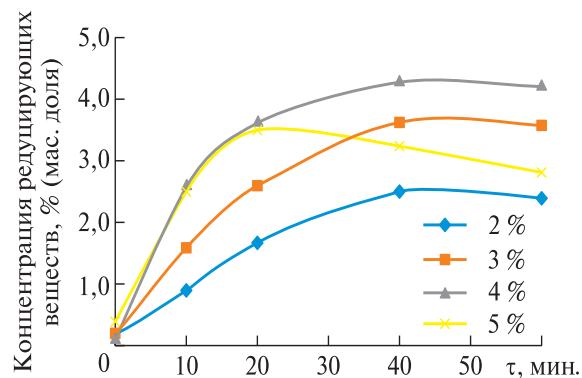


**Рис. 4.** Кинетика изменения концентрации редуцирующих веществ в гидролизате твердого остатка после первой ступени гидролиза (температура гидролиза 170 °C и концентрация сернистой кислоты 2, 3, 4, 6 %, мас. доля)

**Fig. 4.** Kinetics of changes in the concentration of reactive substances in the hydrolysate of the solid residue after the first stage (hydrolysis temperature of 170 °C and sulfuric acid concentration of 2, 3, 4, and 6 %, wt.)

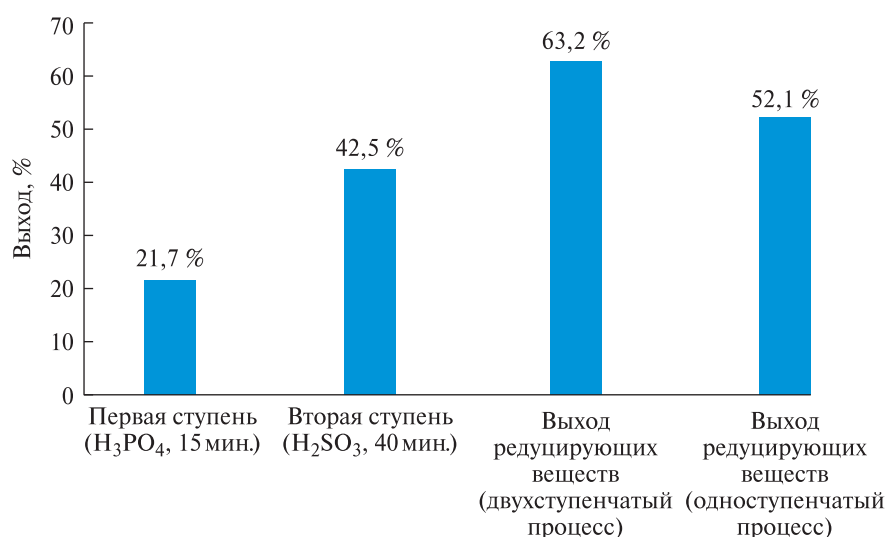


**Рис. 5.** Выход редуцирующих веществ при двухступенчатом гидролизе сосновых опилок по сравнению с одноступенчатым режимом гидролиза в сернистой кислоте

**Fig. 5.** Yield of reducing substances during two-stage hydrolysis of pine sawdust in comparison with a single-stage hydrolysis regime in sulfuric acid

(в первую очередь гемицеллюлозы), при котором обеспечиваются высокая селективность и минимальная деградация образующихся моносахаридов и обогащение гидролизата фосфатами;

– вторая ступень — более интенсивный гидролиз сернистой кислотой (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>), предназначенной для расщепления устойчивой кристаллической целлюлозы.

Использование серной кислоты осложняется не только ее высокой каталитической активностью и потенциальным риском разложения сахаров, но и сложностью последующей очистки. При использовании сернистой кислоты ее удаление из гидролизата можно осуществить простой отгонкой. Проведены также исследования по определению рациональной концентрации фосфорной кислоты на первой ступени гидролиза.

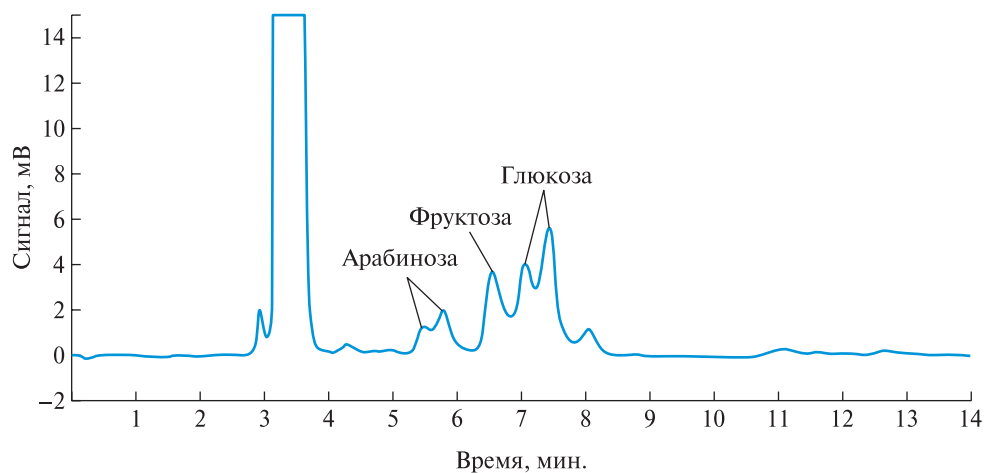


**Рис. 6.** Содержание редуцирующих веществ в образце 1  
**Fig. 6.** Content of reducing substances in sample 1

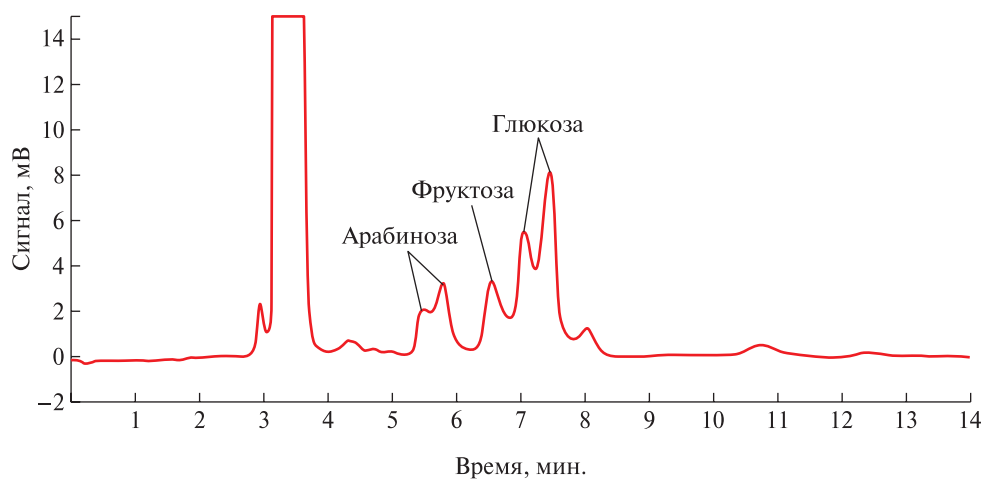


**Рис. 7.** Содержание редуцирующих веществ в образце 2  
**Fig. 7.** Content of reducing substances in sample 2

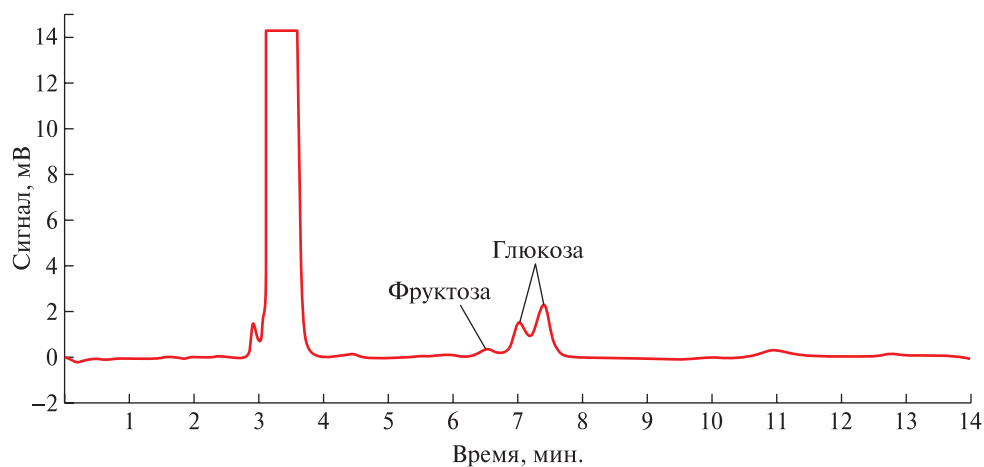


**Рис. 8.** Содержание редуцирующих веществ в образце 3  
**Fig. 8.** Content of reducing substances in sample 3

Как видно из рис. 3, увеличение концентрации фосфорной кислоты ( $H_3PO_4$ ) с 2 до 4 % (мас. доля) приводит к росту максимального выхода редуцирующих веществ с 2,10 % до 3,15 %. Однако дальнейшее повышение концентрации выше 3,5 % (мас. доля) не дает существенного прироста выхода (всего +0,05 %), но увеличивает расход реагента и вязкость реакционной смеси. Таким образом, концентрация 3,5 % (мас. доля) фосфорной кислоты ( $H_3PO_4$ ) выбрана в качестве оптимальной для первой ступени гидролиза.

Результаты исследований влияния концентрации сернистой кислоты ( $H_2SO_3$ ) на выход редуцирующих веществ при температуре 170 °С из твердого остатка гидролиза после первой ступени представлены на рис. 4, из которого видно, что максимальный выход редуцирующих веществ (4,27 %) достигается при концентрации 4 % (мас. доля) на 40-й минуте. Увеличение концентрации до 5 % (мас. доля) приводит к резкому падению кинетической кривой выхода сахаров, что указывает на ускоренное их разложение. При 2 и 3 % (мас. доля) выход редуцирующих веществ существенно ниже (2,50 % и 3,70 % соответственно). Таким образом, в качестве рациональной концентрации принято значение 4 % (мас. доля).

Как видно из рис. 5, суммарный выход редуцирующих веществ, достигающий более 63,2 % при применении комбинированного подхода с последовательным использованием фосфорной и сернистой кислот, превышает показатели для одноступенчатого процесса гидролиза сернистой кислотой более чем на 11 % за счет минимальной дегградации образовавшихся сахаров. Такой режим оптимизирует процесс гидролиза, обеспечивая максимальный выход целевых продуктов для последующего использования в качестве питательной среды в биотехнологических процессах.

Для оптимизации температурного режима был проведен двухступенчатый гидролиз, соответственно, при значениях температуры первой и второй ступеней, равных 160, 170 и 180 °С.

Наибольшее содержание (табл. 2, рис. 6–8) глюкозы (29,25 г/л) зафиксировано в образце 2, полученном при двухступенчатом гидролизе при температуре 170 °С (15 + 40 мин.).

Это значение существенно превышает аналогичные показатели условий при температуре для 160 °С (19,28 г/л) и 180 °С (7,09 г/л). Высокая концентрация глюкозы особенно важна, поскольку именно она является основным субстратом для синтеза полигидроксипропионата штаммом *Cupriavidus necator*.

Т а б л и ц а 2

**Содержание (г/л) моносахаридов  
в образцах гидролизной жидкости**

**The content (g/l) of monosaccharides  
in samples of hydrolyzed liquid**

| Номер образ-ца | Темпера-тура, °С | Араби-ноза | Фруктоза | Глюкоза |
|----------------|------------------|------------|----------|---------|
| 1              | 160              | 3,07       | 7,98     | 19,28   |
| 2              | 170              | 5,95       | 7,03     | 29,25   |
| 3              | 180              | < 0,10     | 0,25     | 7,09    |

Содержание арабинозы также максимально в образце 2 (5,95 г/л), тогда как в образце 3 (180 °С) она практически отсутствует (< 0,10 г/л), что указывает на ее термолабильность при повышенных значениях температуры. Фруктоза присутствует во всех образцах, но ее концентрация снижается с ростом температуры (от 7,98 г/л при 160 °С до 0,25 г/л при 180 °С).

Таким образом, оптимальным режимом для получения гидролизата, пригодного в качестве питательной среды для биосинтеза биополимеров, является двухступенчатый гидролиз при температуре 170 °С с использованием фосфорной кислоты ( $H_3PO_4$ ) (первая ступень, 15 мин.) и сернистой кислоты ( $H_2SO_3$ ) (вторая ступень, 40 мин.). Этот режим обеспечивает максимальный выход глюкозы, минимальное образование ингибиторов и одновременное формирование необходимого минерального состава среды. При этом содержание фосфатов в конечном гидролизате, используемом в качестве питательной среды, может изменяться путем смешения соответствующих пропорций гидролизатов первой и второй ступеней, что обеспечивает необходимые для культивирования бактерий *Cupriavidus necator* показатели в 4,8 г/л в пересчете на ортофосфат калия ( $K_3PO_4$ ).

## Выводы

Разработан и оптимизирован режим двухступенчатого кислотного гидролиза древесных опилок сосны, позволяющий получить гидролизат, пригодный для использования в качестве питательной среды в биотехнологическом производстве.

Установлено, что комбинирование фосфорной и сернистой кислот обеспечивает синергетический эффект: первая ступень (3,5 % (мас. доля)  $H_3PO_4$ , 170 °С, 15 мин.) обеспечивает селективное расщепление гемицеллюлозы, вторая (4 % (мас. доля),  $H_2SO_3$ , 170 °С, 40 мин.) — гидролиз целлюлозного остатка.

Достигнут суммарный выход редуцирующих веществ 62,2 %, что на 11 % превышает показатели одноступенчатого процесса.

Методом ВЭЖХ подтверждена максимальная концентрация глюкозы в оптимальном режиме на уровне 29,25 г/л.

Выявлено обогащение гидролизата фосфатами (до 4,8 г/л в пересчете на  $K_3PO_4$ ), что исключает необходимость внесения дополнительных источников фосфора при культивировании продуцента *Cupriavidus necator*.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-26-00696, <https://rscf.ru/project/25-26-00696>.*

## Список литературы

- [1] Гарынцева Н.В., Левданский В.А., Кондрасенко А.А., Скрипников А.М., Кузнецов Б.Н. Выделение и изучение полисахаридов гемицеллюлоз древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) // Химия растительного сырья, 2022. № 4. С. 44–57.
- [2] Saerova K.V., Safin R.R., Galyavetdinov N.R. High Frequency Low-Temperature Plasma Treatment of Thermally Modified Wood Filler and Its Effect on the Properties of Filled Polymers // Fibre Chemistry, 2025, v. 56, pp. 334–339. <https://doi.org/10.1007/s10692-025-10582-x>
- [3] Cruz G., Santiago P.A., Braz C.E.M. Investigation into the physical–chemical properties of chemically pretreated sugarcane bagasse // J. of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, v. 132, pp. 1039–1053. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7041-1>
- [4] Hubbe M.A., Lavoine N., Lucia L.A., Dou C. Formulating bioplastic composites for biodegradability, recycling, and performance: a review // BioResources, 2021, v. 16, no. 1, pp. 2021–2083.
- [5] Sadeghi Barzegar M., Nitzsche K.N., Bigalke M. Short-term exposure to biodegradable mulch-film microplastics at field-realistic levels shows no effect on lettuce performance and soil health // Microplastics and Nanoplastics, 2026, v. 6, art. 28. <https://doi.org/10.1186/s43591-026-00187-4>
- [6] Borrero-López A.M., Valencia C., Franco J.M. Lignocellulosic materials for the production of biofuels, biochemicals and biomaterials and applications of lignocellulose-based polyurethanes: a review // Polymers, 2022, v. 14, no. 5, art. 881. <https://doi.org/10.3390/polym14050881>
- [7] Zafar A., Aftab M.N., Asif A., Karadag A., Peng L., Ufak H., Lebioglu, Afzal M.S., Hamid A., Iqbal I. Efficient biomass saccharification using a novel cellobiohydrolase from *Clostridium clariflavum* for utilization in biofuel industry // RSC Advances, 2021, v. 11, pp. 9246–9261. <https://doi.org/10.1039/D1RA00545F>
- [8] Vaidya A.A., Murton K.D., Smith D.A. A review on organosolv pretreatment of softwood with a focus on enzymatic hydrolysis of cellulose // Biomass Conversion and Biorefinery, 2022, v. 12, pp. 5427–5442. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02373-9>
- [9] Нуртдинов Р.М., Залалдинов Н.С., Валеева Р.Т. Исследование кинетики и оптимизация условий проведения процессов высокотемпературного гидролиза целлюлозы серной кислотой // Вестник Казанского технологического университета, 2013. № 8. С. 126–128.
- [10] Shi Y., Yokoyama T., Akiyama T., Yashiro M., Matsumoto Y. Degradation kinetics of monosaccharides in hydrochloric, sulfuric, and sulfurous acid // BioResources, 2012, v. 7, no. 3, pp. 4085–4097.
- [11] Wang Y., Li M., Wang Z., Liu S., O'Young L. Furfural production: a review on reaction mechanism and conventional production process // Industrial Crops and Products, 2025, v. 230, art. 121103, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121103>
- [12] Becker M., Ahn K., Bacher M. Comparative hydrolysis analysis of cellulose samples and aspects of its application in conservation science // Cellulose, 2021, v. 28, pp. 8719–8734. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04048-6>
- [13] Oriez V., Peydecastaing J., Pontalier P.Y. Lignocellulosic Biomass Fractionation by Mineral Acids and Resulting Extract Purification Processes: Conditions, Yields, and Purities // Molecules, 2019, v. 24, no. 23, art. 4273, pp. 1–21. <https://doi.org/10.3390/molecules24234273>
- [14] Rafiqul I.S.M., Sakinah A.M.M., Zularisam A.W. Hydrolysis of lignocellulosic biomass for recovering hemicellulose: state of the art // Waste Biomass Management – A Holistic Approach. Eds. Singh L., Kalia V. Cham: Springer, 2017, pp. 73–106. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-49595-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49595-8_4)
- [15] Ананьева О.В., Нуртдинов Р.М., Понкратов А.С., Валеева Р.Т., Шулаев М.В. Сравнительная оценка эффективности процессов гидролиза целлюлозы минеральными кислотами // Деревообрабатывающая промышленность, 2018. № 1. С. 91–95.
- [16] Qi W., Zhang S.P., Xu Q.L., Ren Z.W., Yan Y.J. Degradation kinetics of xylose and glucose in hydrolysate containing dilute sulfuric acid // Chinese J. of Process Engineering, 2008, v. 8, no. 6, pp. 1132–1137.
- [17] Болтовский В.С. Новые способы кислотного гидролиза целлюлозы и растительного сырья // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук, 2021. Т. 57. № 1. С. 119–128. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-119-128>
- [18] Валеева Р.Т., Ананьева О.В., Бариев Р.А., Мухамединова А.Ф. Исследование кинетики и оптимизация процесса высокотемпературного гидролиза смеси пшеничной соломы и отрубей фосфорной кислотой // Вестник технологического университета, 2020. Т. 23. № 1. С. 43–45.
- [19] Hubbe M.A., Chandra R.P., Dogu D., van Velzen S.T.J. Analytical staining of cellulosic materials: a review // BioResources, 2019, v. 14, no. 3, pp. 7387–7464.
- [20] Kamdem Tamo A., Doench I., Deffo G., Zambou Jio-keng S.L., Doungmo G., Fotsop C.G., Tonleu Temgoua R.C., Montembault A., Serghei A., Njanja E., Kenfack Tonle I., Osorio-Madrado A. Lignocellulosic biomass and its main structural polymers as sustainable materials for (bio)sensing applications // J. of Materials Chemistry A., 2025, v. 13, pp. 24185–24253. <https://doi.org/10.1039/d5ta02900g>
- [21] Weimer P.J. Degradation of Cellulose and Hemicellulose by Ruminant Microorganisms // Microorganisms, 2022, v. 10, no. 12, art. 2345, pp. 1–30. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122345>

- [22] Артемов А.В., Бурындин В.Г., Ершова А.С., Ладыгина А.Н. Гидрофобизация пластиков без связующих веществ гидролизным лигнином // *Деревообрабатывающая промышленность*, 2023. № 1. С. 116–124.
- [23] Олиференко Г.Л., Иванкин А.Н., Устюгов А.В. Кислотная деградация древесных отходов как способ получения целевых продуктов // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2024. Т. 28. № 4. С. 130–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-130-137
- [24] Egamberdiev E., Sodiqjonov S.S., Juraev V.N., Kholikova S.J., Aripdjanov O.Y., Sharipova N.I. Study of a two-stage wood chip hydrolysis process and the kinetics of monosaccharide formation // *Vibroengineering Procedia*, 2025, v. 60, pp. 311–317. <https://doi.org/10.21595/vp.2025.25301>
- [25] Chimchetam O., Wirnkor V., Duru C. Optimization and kinetic study of cellulose hydrolysis to glucose catalyzed by phosphoric acid (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) // *International J. of Advanced Research in Chemical Science*, 2020, v. 7, no. 7, pp. 27–32. <https://doi.org/10.20431/2349-0403.0707003>
- [26] Zhang J., Zhang J., Lin L., Chen T., Zhang J., Liu S., Li Z., Ouyang P. Dissolution of microcrystalline cellulose in phosphoric acid: molecular changes and kinetics // *Molecules*, 2009, v. 14, no. 12, pp. 5027–5041. <https://doi.org/10.3390/molecules14125027>
- [27] Валеева Р.Т., Мухачев С.Г., Михайлова С.Ю. Высокотемпературный гидролиз целлюлозы фосфорной кислотой // *Вестник технологического университета*, 2025. № 5. С. 135–137.
- [28] Kumar S., Dheeran P., Singh S.P., Mishra I.M., Adhikari D.K. Kinetic studies of two-stage sulphuric acid hydrolysis of sugarcane bagasse // *Renewable Energy*, 2015, v. 83, pp. 850–858. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.033>
- [29] Бахтиярова А.В., Пименов С.Д., Сизов А.И. Гидролиз гемицеллюлоз древесины при ультранизких концентрациях серной кислоты // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2023. № 1. С. 201–212.
- [30] Guilherme A.A., Dantas P.V.F., Soares J.C.J., dos Santos E.S., Fernandes F.A.N., de Macedo G.R. Pretreatments and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse aiming at the enhancement of the yield of glucose and xylose // *Brazilian J. of Chemical Engineering*, 2017, v. 34, no. 4, pp. 937–947. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170344s20160225>
- [31] Egamberdiev E., Sodiqjonov S.S., Juraev V.N., Kholikova S.J., Aripdjanov O.Y., Sharipova N.I. Study of a two-stage wood chip hydrolysis process and the kinetics of monosaccharide formation // *Vibroengineering Procedia*, 2025, v. 60, pp. 311–317. <https://doi.org/10.21595/vp.2025.25301>
- [32] Wijaya Y.P., Putra R.D.D., Widayana V.T., Ha J.-M., Suh D.J., Kim C.S. Comparative study on two-step concentrated acid hydrolysis for the extraction of sugars from lignocellulosic biomass // *Bioresource Technology*, 2014, v. 164, pp. 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.084>
- [33] Владимцева И.В., Соколов М.В., Тихонова А.А., Селеменчук А.Е. Гидролитическая деструкция целлюлозосодержащих растительных отходов // *Научно-агрономический журнал*, 2025. № 2 (129). С. 27–34. <https://doi.org/10.34736/2025.129.2.003>
- [34] Келдиерова Ш., Тошмуродов Д., Аликулов Б. Обзор современных исследований по ферментативному гидролизу лигноцеллюлозосодержащего сырья // *Вестник науки*, 2020. Т. 3. № 24(1). С. 96–102.
- [35] Li J., Zha Y.-N., Wang H.-M., Tian J.-N., Hou Q.-X. Advances in lignin chemistry during pulping and bleaching // *Industrial Crops and Products*, 2025, v. 229, art. 121004, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121004>
- [36] Kreetachat T., Suriyachai N., Khongchamnan P., Suwannahong K., Wongcharee S., Sakulthaew C., Chokejaroenrat C., Imman S. Optimization of Acid-Catalyzed Hydrolysis and Simultaneous Saccharification and Fermentation for Enhanced Ethanol Production from Sweet Stalk Sorghum // *Catalysts*, 2025, v. 15, art. 379, pp. 1–17. <https://doi.org/10.3390/catal15040379>
- [37] Илалова Г.Ф. Технология переработки древесных отходов в биополимеры и продукты на их основе: дис. ... канд. техн. наук, 4.3.4. Казань: КНИТУ, 2024. 162 с.

## Сведения об авторах

**Саерова Ксения Вячеславовна** — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [senya97@inbox.ru](mailto:senya97@inbox.ru)

**Илалова Гузель Фандасовна** — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [achtung.guzik@mail.ru](mailto:achtung.guzik@mail.ru)

**Сафин Руслан Рушанович** — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [cfaby@mail.ru](mailto:cfaby@mail.ru)

Поступила в редакцию 30.03.2026.

Одобрено после рецензирования 25.03.2026.

Принята к публикации 25.08.2026.

## TWO-STAGE ACID HYDROLYSIS OF PINE WOOD SAW DUST TO PRODUCE MONOSACCHARIDE-BASED NUTRIENT MEDIA

K.V. Saerova, G.F. Ilalova, R.R. Safin✉

Kazan National Research Technological University (KNITU), Russia, 420015, Republic of Tatarstan, Kazan, Karl Marks Street, 68

cfaby@mail.ru

The article describes the technology for processing pine sawdust to obtain monosaccharides-based nutrient media. The objective of the study was to optimize a two-stage acid hydrolysis to maximize the yield of reducing substances with minimal formation of inhibitors. A comparative analysis of the efficiency of sulfuric, sulfurous, and phosphoric acids was conducted. It was experimentally established that the best results are achieved with a combination of acids: the first hydrolysis stage is carried out in a 3,5 % (wt.) solution of phosphoric acid (170 °C, 15 min) to cleave hemicellulose, and the second in a 4 wt. % solution of sulfurous acid (170 °C, 40 min) to hydrolyze the cellulose residue. The total yield of reducing substances in the two-stage hydrolysis was 62,2 %. HPLC showed that the maximum glucose concentration in the optimal mode is 29,25 g/l. The hydrolysate is enriched with phosphates, eliminating the need for additional phosphorus sources when cultivating the polyhydroxybutyrate-producing *Cupriavidus necator*. The developed regimen complies with green chemistry principles and holds promise for the development of domestic technologies to produce biodegradable polymers.

**Keywords:** acid hydrolysis, sulfurous acid, orthophosphoric acid, sawdust, pine, reducing agents, monosaccharides, nutrient medium

**Suggested citation:** Sayerova K.V., Ilalova G.F., Safin R.R. *Dvukhstupenchatyy kislotnyy gidroliz drevesnykh opilok sosny dlya polucheniya pitatel'nykh sred na osnove monosakharidov* [Two-stage acid hydrolysis of pine wood saw dust to produce monosaccharide-based nutrient media]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 5, pp. 106–117. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-106-117

## References

- [1] Garyntseva N.V., Levanskii V.A., Kondrasenko A.A., Skripnikov A.M., Kuznetsov B.N. *Vydelenie i izuchenie polisakharidov gemitselliuloz drevesiny sosny obyknovЕННОй (Pinus sylvestris)* [Isolation and study of hemicellulose polysaccharides from Scots pine wood (*Pinus sylvestris*)]. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2022, no. 4, pp. 44–57.
- [2] Saerova K.V., Safin R.R., Galyavetdinov N.R. High Frequency Low-Temperature Plasma Treatment of Thermally Modified Wood Filler and Its Effect on the Properties of Filled Polymers. *Fibre Chemistry*, 2025, v. 56, pp. 334–339. <https://doi.org/10.1007/s10692-025-10582-x>
- [3] Cruz G., Santiago P.A., Braz C.E.M. Investigation into the physical–chemical properties of chemically pretreated sugarcane bagasse. *J. of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, v. 132, pp. 1039–1053. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7041-1>
- [4] Hubbe M.A., Lavoine N., Lucia L.A., Dou C. Formulating bioplastic composites for biodegradability, recycling, and performance: a review. *BioResources*, 2021, v. 16, no. 1, pp. 2021–2083.
- [5] Sadeghi Barzegar M., Nitzsche K.N., Bigalke M. Short-term exposure to biodegradable mulch-film microplastics at field-realistic levels shows no effect on lettuce performance and soil health. *Microplastics and Nanoplastics*, 2026, v. 6, art. 28. <https://doi.org/10.1186/s43591-026-00187-4>
- [6] Borrero-López A.M., Valencia C., Franco J.M. Lignocellulosic materials for the production of biofuels, biochemicals and biomaterials and applications of lignocellulose-based polyurethanes: a review. *Polymers*, 2022, v. 14, no. 5, art. 881. <https://doi.org/10.3390/polym14050881>
- [7] Zafar A., Aftab M.N., Asif A., Karadag A., Peng L., Ufak H., Lebioglu, Afzal M.S., Hamid A., Iqbal I. Efficient biomass saccharification using a novel cellobiohydrolase from *Clostridium clariflavum* for utilization in biofuel industry. *RSC Advances*, 2021, v. 11, pp. 9246–9261. <https://doi.org/10.1039/D1RA00545F>
- [8] Vaidya A.A., Murton K.D., Smith D.A. A review on organosolv pretreatment of softwood with a focus on enzymatic hydrolysis of cellulose. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, v. 12, pp. 5427–5442. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02373-9>
- [9] Nurtdinov R.M., Zalal'dinov N.S., Valeeva R.T. *Issledovanie kinetiki i optimizatsiia uslovii provedeniia protsessov vysokotemperaturnogo gidroliza tselliulozy sernoi kislotoi* [Study of kinetics and optimization of conditions for high-temperature hydrolysis of cellulose with sulfuric acid]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan National Research Technological University], 2013, no. 8, pp. 126–128.

- [10] Shi Y., Yokoyama T., Akiyama T., Yashiro M., Matsumoto Y. Degradation kinetics of monosaccharides in hydrochloric, sulfuric, and sulfurous acid. *BioResources*, 2012, v. 7, no. 3, pp. 4085–4097.
- [11] Wang Y., Li M., Wang Z., Liu S., O'Young L. Furfural production: a review on reaction mechanism and conventional production process. *Industrial Crops and Products*, 2025, v. 230, art. 121103, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121103>
- [12] Becker M., Ahn K., Bacher M. Comparative hydrolysis analysis of cellulose samples and aspects of its application in conservation science. *Cellulose*, 2021, v. 28, pp. 8719–8734. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04048-6>
- [13] Oriez V., Peydecastaing J., Pontalier P.Y. Lignocellulosic Biomass Fractionation by Mineral Acids and Resulting Extract Purification Processes: Conditions, Yields, and Purities. *Molecules*, 2019, v. 24, no. 23, art. 4273, pp. 1–21. <https://doi.org/10.3390/molecules24234273>
- [14] Rafiqul I.S.M., Sakinah A.M.M., Zularisam A.W. Hydrolysis of lignocellulosic biomass for recovering hemicellulose: state of the art. *Waste Biomass Management – A Holistic Approach*. Eds. Singh L., Kalia V. Cham: Springer, 2017, pp. 73–106. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-49595-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49595-8_4)
- [15] Anan'eva O.V., Nurtidinov R.M., Ponkratov A.S., Valeeva R.T., Shulaev M.V. *Sravnitel'naya otsenka effektivnosti protsessov gidroliza tselliulozy mineral'nymi kislotami* [Comparative assessment of the efficiency of cellulose hydrolysis processes with mineral acids]. *Derevoobratyivaiushchaia promyshlennost'* [Woodworking Industry], 2018, no. 1, pp. 91–95.
- [16] Qi W., Zhang S.P., Xu Q.L., Ren Z.W., Yan Y.J. Degradation kinetics of xylose and glucose in hydrolysate containing dilute sulfuric acid. *Chinese J. of Process Engineering*, 2008, v. 8, no. 6, pp. 1132–1137.
- [17] Boltovskii V.S. *Novye sposoby kislotnogo gidroliza tselliulozy i rastitel'nogo syr'ia* [New methods of acid hydrolysis of cellulose and plant raw materials]. *Ves. Nats. akad. navuk Belarusi. Ser. khim. navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series], 2021, v. 57, no. 1, pp. 119–128. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-119-128>
- [18] Valeeva R.T., Anan'eva O.V., Bariev R.A., Mukhametdinova A.F. *Issledovanie kinetiki i optimizatsii protsessa vysokotemperaturnogo gidroliza smesi pshenichnoi solomy i otrubei fosfornoj kislotoi* [Study of kinetics and optimization of the high-temperature hydrolysis process of a mixture of wheat straw and bran with phosphoric acid]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Technological University], 2020, v. 23, no. 1, pp. 43–45.
- [19] Hubbe M.A., Chandra R.P., Dogu D., van Velzen S.T.J. Analytical staining of cellulosic materials: a review. *BioResources*, 2019, v. 14, no. 3, pp. 7387–7464.
- [20] Kamdem Tamo A., Doench I., Deffo G., Zambou Jikeng S.L., DOUNGMO G., Fotsop C.G., Tonleu Temgoua R.C., Montebault A., Serghei A., Njanja E., Kenfack Tonle I., Osorio-Madrado A. Lignocellulosic biomass and its main structural polymers as sustainable materials for (bio)sensing applications. *J. of Materials Chemistry A.*, 2025, v. 13, pp. 24185–24253. <https://doi.org/10.1039/d5ta02900g>
- [21] Weimer P.J. Degradation of Cellulose and Hemicellulose by Ruminant Microorganisms. *Microorganisms*, 2022, v. 10, no. 12, art. 2345, pp. 1–30. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122345>
- [22] Artemov A.V., Buryndin V.G., Ershova A.S., Ladygina A.N. *Gidrofobizatsiya plastikov bez svyazuiushchikh veshchestv gidroliznym ligninom* [Hydrophobization of plastics without binders using hydrolytic lignin]. *Derevoobratyivaiushchaia promyshlennost'* [Woodworking Industry], 2023, no. 1, pp. 116–124.
- [23] Oliferenko G.L., Ivankin A.N., Ustyugov A.V. *Kislotnaya degradatsiya drevesnykh otkhodov kak sposob polucheniya tselevykh produktov* [Wood waste acid degradation to obtain target products]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 4, pp. 130–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-130-137
- [24] Egamberdiev E., Sodiqjonov S.S., Juraev V.N., Kholikova S.J., Aripdjanov O.Y., Sharipova N.I. Study of a two-stage wood chip hydrolysis process and the kinetics of monosaccharide formation. *Vibroengineering Procedia*, 2025, v. 60, pp. 311–317. <https://doi.org/10.21595/vp.2025.25301>
- [25] Chimchetam O., Wirnkor V., Duru C. Optimization and kinetic study of cellulose hydrolysis to glucose catalyzed by phosphoric acid (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). *International J. of Advanced Research in Chemical Science*, 2020, v. 7, no. 7, pp. 27–32. <https://doi.org/10.20431/2349-0403.0707003>
- [26] Zhang J., Zhang J., Lin L., Chen T., Zhang J., Liu S., Li Z., Ouyang P. Dissolution of microcrystalline cellulose in phosphoric acid: molecular changes and kinetics. *Molecules*, 2009, v. 14, no. 12, pp. 5027–5041. <https://doi.org/10.3390/molecules14125027>
- [27] Valeeva R.T., Mukhachev S.G., Mikhailova S.Iu. *Vysokotemperaturnyi gidroliz tselliulozy fosfornoj kislotoi* [High-temperature hydrolysis of cellulose with phosphoric acid]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Technological University], 2025, no. 5, pp. 135–137.
- [28] Kumar S., Dheeran P., Singh S.P., Mishra I.M., Adhikari D.K. Kinetic studies of two-stage sulphuric acid hydrolysis of sugarcane bagasse. *Renewable Energy*, 2015, v. 83, pp. 850–858. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.033>
- [29] Bakhtiarova A.V., Pimenov S.D., Sizov A.I. *Gidroliz gemitselliuloz drevesiny pri ul'tranizkikh kontsentratsiiakh sernoi kisloty* [Hydrolysis of wood hemicelluloses at ultra-low concentrations of sulfuric acid]. *Russian Forestry J.*, 2023, no. 1, pp. 201–212.
- [30] Guilherme A.A., Dantas P.V.F., Soares J.C.J., dos Santos E.S., Fernandes F.A.N., de Macedo G.R. Pretreatments and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse aiming at the enhancement of the yield of glucose and xylose. *Brazilian J. of Chemical Engineering*, 2017, v. 34, no. 4, pp. 937–947. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170344s20160225>
- [31] Egamberdiev E., Sodiqjonov S.S., Juraev V.N., Kholikova S.J., Aripdjanov O.Y., Sharipova N.I. Study of a two-stage wood chip hydrolysis process and the kinetics of monosaccharide formation. *Vibroengineering Procedia*, 2025, v. 60, pp. 311–317. <https://doi.org/10.21595/vp.2025.25301>

- [32] Wijaya Y.P., Putra R.D.D., Widayaya V.T., Ha J.-M., Suh D.J., Kim C.S. Comparative study on two-step concentrated acid hydrolysis for the extraction of sugars from lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 2014, v. 164, pp. 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.084>
- [33] Vladimtseva I.V., Sokolov M.V., Tikhonova A.A., Selemenchuk A.E. *Gidroliticheskaia destrukttsiia tselliulozosoderzhashchikh rastitel'nykh otkhodov* [Hydrolytic destruction of cellulose-containing plant waste]. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal* [Scientific and Agronomic Journal], 2025, no. 2 (129), pp. 27–34. <https://doi.org/10.34736/2025.129.2.003>
- [34] Keldierova Sh., Toshmurodov D., Alikulov B. *Obzor sovremennykh issledovaniy po fermentativnomu gidrolizu lignotselliulozosoderzhashchego syr'ia* [Review of modern research on enzymatic hydrolysis of lignocellulose-containing raw materials]. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science], 2020, v. 3, no. 24(1), pp. 96–102.
- [35] Li J., Zha Y.-N., Wang H.-M., Tian J.-N., Hou Q.-X. Advances in lignin chemistry during pulping and bleaching. *Industrial Crops and Products*, 2025, v. 229, art. 121004, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121004>
- [36] Kreetachat T., Suriyachai N., Khongchamnan P., Suwannahong K., Wongcharee S., Sakulthaew C., Chokejaroenrat C., Imman S. Optimization of Acid-Catalyzed Hydrolysis and Simultaneous Saccharification and Fermentation for Enhanced Ethanol Production from Sweet Stalk Sorghum. *Catalysts*, 2025, v. 15, art. 379, pp. 1–17. <https://doi.org/10.3390/catal15040379>
- [37] Ilalova G.F. *Tekhnologiya pererabotki drevesnykh otkhodov v biopolimery i produkty na ikh osnove* [Technology for processing wood waste into biopolymers and products based on them]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Kazan: Kazan National Research Technological University, 2024, 162 p.

*The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 25-26-00696, <https://rscf.ru/project/25-26-00696>).*

## Authors' information

**Saerova Ksenia Vyacheslavovna** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Kazan National Research Technological University, [senya97@inbox.ru](mailto:senya97@inbox.ru)

**Ilalova Guzel' Fandasovna** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Kazan National Research Technological University, [achtung.guzik@mail.ru](mailto:achtung.guzik@mail.ru)

**Safin Ruslan Rushanovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Architecture and Design of Wood Products of the Kazan National Research Technological University, [cfaby@mail.ru](mailto:cfaby@mail.ru)

Received 30.03.2026.

Approved after peer review 25.03.2026.

Accepted for publication 25.08.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest