

УДК 676.16.022.6

Н. В. Черная¹, Н. А. Герман¹, Г. Р. Рахманбердиев², А. Ш. Хусенов²¹Белорусский государственный технологический университет²Ташкентский химико-технологический институт (Республика Узбекистан)**ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ И ОДНОЛЕТНИХ РАСТЕНИЙ НА ВЫХОД И КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ**

Получение целлюлозосодержащих продуктов (целлюлозы и полуцеллюлозы) по энергосберегающим технологиям основывалось на химической переработке древесного сырья (щепы сосны) и однолетних растений (стеблей топинамбура) с использованием натронного способа варки. Исследовали выход и компонентные составы полученных образцов целлюлозы и полуцеллюлозы при изменении составов варочных растворов (содержание едкого натра C_{NaOH} изменяли с 10 до 60 г/л), температуры t (уменьшали со 170 до 120°C) и продолжительности варочного процесса τ (снижали с 6,0–7,0 до 4,5–5,0 ч при получении целлюлозы и до 1,0–3,0 ч при получении полуцеллюлозы). Свойства полученных продуктов характеризовали стандартными показателями: выход (В), содержание компонентов (α -целлюлозы (Ц), лигнина (Л), смол и жиров (СЖ)), перманганатная жесткость (ПЖ), влажность (Вл), зольность (З) и степень полимеризации (СП). Эти показатели сравнивали с показателями сульфатной целлюлозы.

Предложены рациональные способы применения целлюлозы и полуцеллюлозы с улучшенными свойствами в технологии бумаги и картона.

Ключевые слова: сосна, топинамбур, натронная варка, делигнификация, лигноуглеводные комплексы, целлюлоза, полуцеллюлоза, получение, свойства, применение.

Для цитирования: Черная Н. В., Герман Н. А., Рахманбердиев Г. Р., Хусенов А. Ш. Влияние способов химической переработки древесного сырья и однолетних растений на выход и компонентный состав целлюлозосодержащих продуктов // Труды БГТУ. Сер. 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 2 (295). С. 135–144.

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-17.

N. V. Chernaya¹, N. A. Herman¹, G. R. Rakhmanberdiev², A. Sh. Xusenov²¹Belarusian State Technological University²Tashkent Chemical Technological Institute (Republic of Uzbekistan)**INFLUENCE OF METHODS OF CHEMICAL PROCESSING OF WOOD RAW MATERIALS AND ANNUAL PLANTS ON THE OUTPUT AND COMPONENT COMPOSITION OF CELLULOSE-CONTAINING PRODUCTS**

The production of cellulose-containing products (cellulose and semi-cellulose) using energy-saving technologies was based on the chemical processing of wood raw materials (pine chips) and annual plants (Jerusalem artichoke stems) using the soda cooking method. The yield and component compositions of the obtained cellulose and semi-cellulose samples were studied by changing the compositions of the cooking solutions (the caustic soda content C_{NaOH} was changed from 10 to 60 g/l), temperature t (decreased from 170 to 120°C) and the duration of the cooking process τ (decreased from 6.0–7.0 to 4.5–5.0 h when obtaining cellulose and to 1.0–3.0 h when obtaining semi-cellulose). The properties of the obtained products were characterized by standard indicators: yield (Y), content of components (α -cellulose (C), lignin (L), resins and fats (RF)), permanganate hardness (PH), moisture (MH), ash content (AC) and degree of polymerization (DP). These indicators were compared with those of sulfate cellulose.

Rational methods for using cellulose and semi-cellulose with improved properties in paper and cardboard technology are proposed.

Keywords: pine, Jerusalem artichoke, soda cooking, delignification, lignocarbhydrate complexes, cellulose, semi-cellulose, production, properties, application.

For citation: Chernaya N. V., Herman N. A., Rakhmanberdiev G. R., Xusenov A. Sh. Influence of methods of chemical processing of wood raw materials and annual plants on the output and component composition of cellulose-containing products. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 135–144 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-17.

Введение. Современное развитие целлюлозно-бумажной промышленности характеризуется постоянным расширением ассортимента и наращиванием объемов производства востребованных видов бумаги и картона, отличающихся свойствами и областью применения. Для их получения применяют различные виды волокнистых полуфабрикатов и вспомогательные химические вещества. Особое значение имеют волокнистые полуфабрикаты и их потребительские свойства (бумагообразующие, структурообразующие, прочность и др.) [1, 2].

Волокнистые полуфабрикаты, используемые в технологии бумаги и картона, представляют собой целлюлозосодержащие продукты [3–8]. Присутствующие в них целлюлозные волокна относятся к основным компонентам. Целлюлозные волокна формируют структуру бумаги и картона и влияют на их потребительские свойства [2, 9]. Такие волокна присутствуют в древесном сырье (хвойных и лиственных пород древесины) и однолетних растениях (например, в стеблях топинамбура). Сопутствующие вещества (минеральные, экстрактивные и др.) частично остаются в товарных целлюлозосодержащих продуктах – целлюлозе и полуцеллюлозе.

Исходным сырьем для получения целлюлозы и полуцеллюлозы выступают хвойные и лиственные породы древесины, а также однолетние растения (новый вид – стебли топинамбура [10–16]).

В настоящее время из клубней топинамбура получают глюкозно-фруктозный сироп для лечения больных сахарным диабетом. После использования клубней остается наземная часть топинамбура (в виде стеблей), которая, не находя до настоящего времени своего применения, сжигается. Анализируя полученные результаты по химическому составу вегетативной части топинамбура, можно считать, что это однолетнее растение представляет собой лигноуглеводный комплекс, в котором на долю углеводов приходится около 70%, причем на долю целлюлозы в нем приходится более 40% от общего содержания полисахаридов. Это свидетельствует о том, что топинамбур является одним из перспективных источников для получения целлюлозосодержащих продуктов (например, в виде полуцеллюлозы), пригодных для дальнейшего применения в технологии бумаги и картона.

Один из перспективных способов получения целлюлозосодержащих продуктов – химическая переработка древесного сырья [3–5] и однолетних растений [9, 10–16]. Наиболее доступным считается натронный способ варки. Сущность такой переработки заключается в обеспечении химического взаимодействия присутствующих компонентов (лигнина и сопутствующих веществ)

с активными катионами и анионами варочных растворов. Содержание лигнина в древесном сырье достигает 28–32%, а в однолетних растениях – менее 15%. Одной из основных проблем при химической переработке многих видов сырья является повышение степени удаления лигнина за счет протекающей реакции делигнификации. Сопутствующие вещества (минеральные, экстрактивные и т. д.) претерпевают изменения и частично переходят в варочный раствор; оставшаяся их часть присутствует в целлюлозосодержащем продукте, в котором основным компонентом выступает целлюлоза.

В настоящее время для химической переработки древесного сырья и однолетних растений используют различные способы [3–5, 8–16]: натронный, сульфатный, сульфитный, бисульфитный, моносульфитный и др. Данные способы отличаются составами варочных растворов, содержанием в них активных катионов и анионов, температурой и продолжительностью химического взаимодействия компонентов варочного раствора с молекулами лигнина, присутствующими в перерабатываемых видах древесного сырья и однолетних растений. Основным процессом является делигнификация. Полученные товарные продукты представляют собой целлюлозосодержащие продукты в виде технических видов целлюлозы и полуцеллюлозы.

Эффективность процесса делигнификации и свойства полученных целлюлозосодержащих продуктов зависят от состава варочного раствора, температуры и продолжительности химического взаимодействия присутствующих в нем активных катионов и анионов.

К перспективным способам химической переработки древесного сырья и однолетних растений относится натронный способ. Варочный раствор получают путем растворения едкого натра NaOH в воде. Существующая технология использования натронного способа основана на том, что для каждого вида перерабатываемого сырья используют конкретный график варки, который учитывает следующие основные параметры: концентрацию раствора (изменяют с 10 до 120 г/л), температуру (повышают с 20–60 до 120–180°C) и продолжительность процесса делигнификации (увеличивают с 1,5 до 8,0 ч).

Актуальной научной и технической проблемой при химической переработке лигноуглеводных комплексов (древесного сырья и однолетних растений) являются, с одной стороны, сохранение структуры и степени полимеризации целлюлозных волокон и, с другой – предотвращение их деструкции.

Отсутствие информации о применении натронного способа для химической переработки древесного сырья и однолетних растений

по энергосберегающим технологиям при одновременном повышении качества полученных целлюлозосодержащих продуктов (целлюлозы и полуцеллюлозы) обуславливает актуальность настоящей работы с научной и практической точек зрения. Эффект энергосбережения может проявляться в снижении температуры и сокращении продолжительности натронной варки.

Цель исследования – изучение влияния натронного способа химической переработки древесного сырья и однолетних растений на выход и компонентный состав целлюлозосодержащих продуктов и разработка энергосберегающих технологий получения целлюлозы и полуцеллюлозы.

Предмет исследования – процессы и явления, протекающие с компонентами лигноуглеводного комплекса древесного сырья и однолетних растений при изменении условий их химической переработки по натронному способу и обеспечивающие эффект энергосбережения при получении на их основе целлюлозосодержащих продуктов в виде целлюлозы и полуцеллюлозы.

Объекты исследования – образцы целлюлозы и полуцеллюлозы, полученные путем химической переработки древесного сырья и однолетних растений и предназначенные для изготовления на их основе массовых видов бумаги и картона.

Исследования проводили в рамках Дорожной карты сотрудничества между учреждением образования «Белорусский государственный технологический университет» (БГТУ, г. Минск, Республика Беларусь) и Ташкентским химикотехнологическим институтом (ТашХТИ, г. Ташкент, Узбекистан) на 2025–2029 гг.

Основная часть. Исследовали сначала древесное сырье (щепы сосны), а затем однолетние растения (измельченные стебли топинамбура *Helianthus tuberosus* L.). Химическую переработку древесного сырья осуществляли с использованием натронного и сульфатного способов варки; свойства полученной натронной целлюлозы сравнивали со свойствами сульфатной целлюлозы. Однолетние растения использовали для получения полуцеллюлозы по натронному способу варки.

Химическая переработка древесного сырья. Для получения целлюлозосодержащих продуктов в виде натронной целлюлозы использовали отобранные пробы производственной партии щепы сосны, полученной в условиях ОАО «Светлогорский целлюлозно-картонный комбинат» (г. Светлогорск, Республика Беларусь). Это предприятие является единственным в Республике Беларусь, на котором из отечественного древесного сырья (преимущественно сосны) производят первичные волокнистые полуфабрикаты (целлюлозу сульфатную и бисульфитную). Эту целлюлозу используют целлю-

лозно-бумажные предприятия концерна «Беллесбумпром» для производства широкого ассортимента бумаги и картона.

Предлагаемый натронный способ (применяют раствор едкого натра NaOH) отличается от традиционных (сульфатного и бисульфитного) видом основания в варочном растворе и условиями процесса делигнификации. Сульфатный и бисульфитный способы получения целлюлозы основаны на использовании сульфатного щелока (содержит едкий натр NaOH и сульфид натрия Na_2S) и бисульфитного варочного раствора (содержит бисульфит магния $\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$).

Исследования проводили с применением нового для Республики Беларусь способа получения целлюлозы – натронного, основанного на использовании раствора едкого натра NaOH.

Натронная и сульфатная варка относятся к щелочным способам получения целлюлозы [4], а бисульфитная варка – к кислотным (сульфитным) способам [3]. В первом случае процесс делигнификации протекает при pH 11–13, а во втором случае – при pH 4–6.

Исследование проводили с натронными и сульфатными варочными растворами по общепринятому графику щелочной варки [4].

Объект исследования – целлюлоза, полученная по натронному и сульфатному способам с использованием щепы сосны.

Натронную целлюлозу получали с помощью изменения не только содержания NaOH в варочном растворе C_{NaOH} с 30 до 60 г/л, но и температуры t со 170°C (традиционная технология) до $155\text{--}160^\circ\text{C}$ (предлагаемая энергосберегающая технология). Продолжительность протекающего процесса делигнификации τ изменяли с 6,0–7,0 до 4,5–5,0 ч, что способствовало усилению эффекта энергосбережения.

Варочные растворы содержали активную щелочь (C_{NaOH}) в количестве 30–60 г/л в ед. Na_2O и имели pH 13–14. К концу варки концентрация активной щелочи уменьшалась примерно в 10 раз, а pH снижалось (до 12–13). Это происходило, по нашему мнению, потому, что к концу варки в щелоке присутствовало большое количество натриевых солей слабых минеральных и органических кислот, а это вызывало создание значительной щелочной буферной емкости.

Для полученных целлюлозосодержащих продуктов определяли по стандартным методикам такие свойства, как выход (В), перманганатную жесткость (ПЖ), зольность (З), содержание компонентов (лигнина (Л), жиров и смол (ЖС), α -целлюлозы (Ц)) и степень полимеризации (СП).

Условия получения и свойства полученных образцов целлюлозосодержащих продуктов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Влияние условий химической переработки древесного сырья
на свойства целлюлозосодержащих продуктов**

Номер образца	Условия химической переработки			Свойства целлюлозосодержащих продуктов						
	C _{NaOH} , г/л	t, °C	τ, ч	выход (В), %	перманганатная жесткость (ПЖ)	зольность (З), %	Содержание компонентов, %			СП
							лигнин (Л)	жиры и смолы (ЖС)	α-целлюлоза (Ц)	
1	30	155	4,5	65,0	133	1,13	7,7	0,26	83,3	3800
2	40			44,6	112	0,95	5,2	–	86,3	3050
3	50	160	5,0	40,3	92	0,88	2,2	0,20	88,3	2600
4	60			38,5	76	0,91	1,6	0,19	89,8	2350

Из табл. 1 видно, что полученные целлюлозосодержащие продукты относятся к техническим видам целлюлозы:

- 1 – целлюлоза жесткая;
- 2 – целлюлоза нормальной жесткости;
- 3 – целлюлоза средней жесткости;
- 4 – целлюлоза мягкая.

Полученные виды целлюлозы (образцы 1–4) отличаются степенью провара, характеризующей остаточное содержание лигнина. По этому показателю существующие виды целлюлозы, согласно международной классификации [4], разделяют на следующие группы: целлюлозы жесткие содержат от 3,1 до 7,7% лигнина, целлюлозы средней жесткости – от 1,7 до 3,1% и целлюлозы мягкие – менее 1,7%.

Установлено, что вид технической целлюлозы зависит от ее химического состава. Выход целлюлозы при глубоком проваре снижается из-за растворения лигнина и других компонентов растительной ткани, главным образом гемицеллюлоз. При получении мягких целлюлоз неизбежным является частичное разрушение самой клетчатки (целлюлозы).

Сохранение гемицеллюлоз желательно, если целлюлоза предназначена для изготовления бумаги и картона. Поэтому «идеальный» с этой точки зрения процесс делигнификации должен обеспечивать только удаление лигнина. В промышленных условиях дополнительно происходит частичное растворение углеводов (гемицеллюлоз и целлюлозы). Избирательностью или селективностью процесса делигнификации называют соотношение количеств растворенного лигнина и углеводов. Чем это соотношение больше, тем «селективнее» растворяется лигнин, тем выше выход технической целлюлозы.

Потеря выхода целлюлозы при глубоком проваре объясняется прежде всего растворением лигнина, но наряду с этим всегда частично разрушаются и переходят в раствор другие компоненты растительной ткани – главным образом гемицеллюлозы, имеющие углеводную

природу, а при получении мягких целлюлоз более или менее неизбежно частичное разрушение самой клетчатки.

Ниже представлены результаты сравнения натронной и сульфатной варок, выполненных в лабораторных условиях кафедры химической переработки БГТУ.

Установлено, что растворение веществ древесины начиналось почти с первого момента соприкосновения компонентов варочного раствора со щепой. При натронной и сульфатной варках, для которых расход и начальная концентрация активной щелочи являлись одинаковыми, по истечении первого часа варки, когда температура составляла около 100°C, в раствор в обоих случаях переходило 6–8% вещества древесины, но лигнин не начинал растворяться. На третьем часе варки при достижении температуры 160°C в случае сульфатного процесса растворялось уже около 60% лигнина и выход целлюлозы составлял 54%, в то время как при натронной варке растворение лигнина в этот момент только начиналось, а общий выход древесного остатка составлял 73%.

Получено, что в течение последующего подъема температуры до максимальной (170°C) лигнин в обоих случаях быстро растворялся. Процесс относительного торможения растворения вещества древесины продолжался и во время стоянки на конечной температуре, причем в этот период резко замедлялось растворение лигнина. Если по истечении 5 ч 40 мин сульфатную варку прекращали и в результате получали целлюлозу с выходом 44,6% от древесины, содержащую 2,2% лигнина, то натронная варка к этому моменту давала почти такой же выход целлюлозы (образец 2), но содержащей 5,2% лигнина. Для того чтобы добиться такой же степени делигнификации, как при сульфатном процессе, процесс натронной варки продлевали еще на 3 ч, что приводило к снижению выхода целлюлозы до 39% от древесины.

Установлено, что скорость перехода в раствор углеводов, в частности пентозанов, являлась практически одинаковой для натронной и сульфатной варок. Основная часть активной щелочи связывалась с кислыми продуктами разрушения полисахаридов древесины. Концентрация гидроксильных ионов в варочном растворе в течение всей варки оставалась на высоком и почти постоянном уровне. Следует отметить, что при сульфатной варке при одном и том же значении pH буферная емкость варочного раствора оказывалась меньшей, чем при натронной. Сильных органических кислот ни при натронной, ни при сульфатной варке не образовывалось.

При сульфатной варке, помимо активной щелочи, на химические реакции с лигнином расходовалась сульфидная сера. Расходование Na_2S оказывалось более интенсивным на первом этапе варки и замедлялось по мере перехода лигнина в раствор. Общий расход сульфидной серы составляет 1,0–1,5% от массы древесины. Участие сульфидной серы в реакциях с лигнином при сульфатной варке в значительной степени облегчало переход его в раствор по сравнению с натронной варкой.

Получено, что температура оказывала незначительное влияние на процесс гидролиза. Так, при температуре 25°C происходил гидролиз Na_2S и образовывался NaHS на 40%, а при 165°C – на 76–88%.

Установлено, что в процессе натронной варки протекали следующие изменения:

- легкогидролизуемые полисахариды подвергались глубокому распаду с образованием органических кислот (оксикислот в виде лактонов);

- моносахариды (гексозы и пентозы) образовывали глюкозу и фруктозу, из которых в дальнейшем можно получить до 50% молочной кислоты и 0,5–2,0% муравьиной кислоты;

- гемицеллюлозы после набухания подвергались нейтрализации щелочью карбоксильных ($-\text{COOH}$) групп, а при последующем увеличении в варочном котле процесс их набухания значительно ускорился и, как следствие,

в варочный раствор переходили молекулы гемицелллюлоз.

К особенностям сульфатной варки относилось то, что сульфидная сера защищала углеводы от «расщепления» концевых альдегидных групп. Остальные компоненты претерпевали следующие изменения:

- метоксильные группы лигнина образовывали метилмеркаптан CH_3SH и диметилсульфид CH_3SCH_3 , имеющие неприятный запах;

- гемицеллюлозы переходили в раствор в виде оксикислот и простых органических кислот (щавелевой, муравьиной и др.);

- маннаны и ксиланы растворялись на 60–70 и 50–60% соответственно;

- галактан и арабан полностью растворялись.

Результаты исследования (табл. 1) свидетельствуют о практической возможности получения натронных видов целлюлозы (жесткой, нормальной и средней жесткости, а также мягкой) по энергосберегающим технологиям. Об этом свидетельствуют снижение температуры варочного процесса на 10–15°C (со 170 до 155–160°C) и сокращение его продолжительности на 1,0–1,5 ч (с 6,0 до 4,5–5,0 ч).

Следовательно, химическая переработка древесного сырья по натронному способу позволяет получать технические виды целлюлозы, отличающиеся свойствами (табл. 1) и областью применения (табл. 2). Принимая во внимание свойства полученных образцов целлюлозы и общепринятую классификацию известных видов целлюлозы по ее выходу [4], можно рекомендовать применение образцов 1–4 в технологии массовых видов бумаги и картона.

Сопоставительный анализ данных, представленных в табл. 1 и 2, свидетельствует о том, что изменение условий химической переработки древесного сырья позволяет получать целлюлозосодержащие продукты, представляющие собой технические виды целлюлозы и отличающиеся выходом, компонентным составом, свойствами и областью применения.

Таблица 2

Предлагаемые области применения полученных технических видов целлюлозы

Номер образца	Вид целлюлозы	Выход, % от древесины	Область применения
1	Жесткая	55–65	Тароупаковочные виды картона
2	Нормальной жесткости	44–54	Бумага мешочная, оберточная, упаковочная и другие технические виды бумаги
3	Средней жесткости	40–43	Электротехнические виды бумаги и картона, технические виды бумаги
4	Мягкая	35–39	Для производства впитывающих видов бумаги

Таким образом, выход и компонентный состав полученных целлюлозосодержащих продуктов (технических видов целлюлозы жесткой, нормальной и средней жесткости, мягкой) зависит от способов химической переработки древесного сырья. На примере щепы сосны показано, что использование натронного способа и изменение его условий (концентрации варочного раствора, температуры и продолжительности процесса варки) позволяет получать из древесного сырья технические виды целлюлозы различных видов (жесткие, нормальной жесткости, средней жесткости и мягкие), отличающиеся свойствами и областью применения. Показано, что натронный способ химической переработки хвойных пород древесины (например, сосны) по сравнению с сульфатным является энергосберегающим; об этом свидетельствуют снижение температуры варочного процесса на 10–15°C (со 170 до 155–160°C) и сокращение его продолжительности на 1,5–2,0 ч (с 6,0–7,0 до 4,5–5,0 ч).

Химическая переработка однолетних растений. Для получения целлюлозосодержащих продуктов на основе однолетних растений выбраны стебли быстрорастущего топинамбура *Helianthus tuberosus* L. Этот вид сырья произрастает во многих странах, включая Узбекистан и Республику Беларусь. Поскольку в настоящее время используют только клубни этого однолетнего растения, а наземную его часть (стебли), как правило, сжигают, то научный и практи-

ческий интерес представляет исследование, направленное на разработку рационального применения стеблей топинамбура (содержат целлюлозные и сопутствующие компоненты) вместо их сжигания.

Для исследования использовали измельченные наземные части (стебли) топинамбура *Helianthus tuberosus* L., произрастающие в Узбекистане.

Объект исследования – стебли топинамбура *Helianthus tuberosus* L. и полученные на их основе целлюлозосодержащие продукты в виде полуцеллюлозы, пригодные для изготовления бумаги и картона.

В табл. 3 представлены результаты исследования по изучению влияния условий химической переработки однолетних растений (измельченных стеблей топинамбура *Helianthus tuberosus* L.) на свойства полученных целлюлозосодержащих продуктов. Процесс натронной варки проводили при различных условиях: содержание едкого натра NaOH (C_{NaOH}) в варочном растворе увеличивали с 10 до 30 г/л, температуру (t) повышали со 130 до 170°C и продолжительность процесса варки (τ) изменяли от 1,0 до 3,0 ч. Свойства целлюлозосодержащих продуктов характеризовали такими общепринятыми показателями, как выход (В), влажность (Вл), зольность (З), содержание α -целлюлозы (Ц) и степень полимеризации (СП). Их определяли по стандартным методикам.

Таблица 3

Влияние условий химической переработки стеблей топинамбура *Helianthus tuberosus* L. на свойства полученных целлюлозосодержащих продуктов

Номер образца	Условия химической переработки			Свойства целлюлозосодержащих продуктов				
	C_{NaOH} , г/л	t , °C	τ , ч	выход (В), %	влажность (Вл), %	зольность (З), %	содержание α -целлюлозы, (Ц), %	СП
1	10	150	2,0	15,0	–	–	–	–
2	15			20,5	3,0	0,90	87,0	1300
3	20			42,1	3,0	0,87	90,1	1250
4	25			36,9	3,2	0,81	91,2	1040
5	30			32,2	3,4	0,79	92,4	870
6	20	130		25,0	–	–	–	–
7		140		30,0	3,2	0,90	90,0	1340
8		150		42,1	3,0	0,87	90,1	1250
9		160		38,9	38,9	38,9	38,9	38,9
10		170		32,4	32,4	32,4	32,4	32,4
11		150	1,0	–	–	–	–	–
12			1,5	–	–	–	–	–
13			2,0	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1
14			2,5	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6
15			3,0	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8

Исследование проводили в три этапа.

На первом получали целлюлозосодержащие продукты (образцы 1–5) путем химической переработки стеблей топинамбура *Helianthus tuberosus* L. по натронному способу варки. Содержание едкого натра NaOH в варочном растворе увеличивали с 10 до 30 г/л. При этом температура (t) и продолжительность варочного процесса (τ) были постоянными и составляли $t = 150$ мин и $\tau = 2,0$ ч. Из полученных целлюлозосодержащих продуктов выбран образец 3 (полуцеллюлоза), отличающийся от образцов 1, 2 и 4 повышенным выходом, достигающим 42,1%, и высокой степенью полимеризации (СП = 1250). Получено, что положительные результаты достигались при следующих условиях химической переработки стеблей топинамбура *Helianthus tuberosus* L.: $C_{\text{NaOH}} = 20$ г/л при фиксированных значениях двух других параметров – $t = 150^\circ\text{C}$ и $\tau = 2,0$ ч.

На втором этапе целлюлозосодержащие продукты (образцы 6–10) получали путем химической переработки стеблей топинамбура *Helianthus tuberosus* L. при постоянном содержании NaOH в варочном растворе ($C_{\text{NaOH}} = 20$ г/л) и увеличении температуры (t) протекающего химического процесса (преимущественно делигнификации) со 130 до 170°C . При этом продолжительность процесса варки составляла $\tau = 2,0$ ч. Результаты исследования позволили оценить влияние температуры процесса варки (t) на свойства целлюлозосодержащих продуктов, представляющих собой полуцеллюлозы, и выбрать предпочтительные значения температуры, которая составила $t = 150^\circ\text{C}$ при $C_{\text{NaOH}} = 20$ г/л и $\tau = 2,0$ ч.

На третьем этапе получали целлюлозосодержащие продукты (образцы 11–15) при одинаковых значениях двух технологических параметров, когда $C_{\text{NaOH}} = 20$ г/л и $t = 150^\circ\text{C}$, и при изменении третьего параметра – продолжительности химической переработки однолетних растений (τ). При этом τ уменьшали с 2,0 до 1,0 ч ($\tau < 2,0$ ч) и увеличивали с 2,0 до 3,0 ч ($\tau > 2,0$ ч).

Сопоставительный анализ результатов исследования, представленных в табл. 3, свидетельствует о влиянии технологических параметров (C_{NaOH} , t и τ) натронного способа химической переработки однолетних растений на выход и компонентный состав полученных целлюлозосодержащих продуктов, которые можно отнести к группе первичных волокнистых полуфабрикатов (в виде целлюлозы), широко применяемых в технологии бумаги и картона.

На примере целлюлозосодержащих продуктов, полученных на основе химической переработки однолетних растений (например,

стеблей топинамбура *Helianthus tuberosus* L.), установлены следующие особенности:

- при $C_{\text{NaOH}} = 20$ г/л, $t = 150^\circ\text{C}$ и $\tau = 2$ ч не происходило или происходило только частично (незначительное) растворение нецеллюлозных компонентов, присутствующих в исходном сырье; поэтому такие условия не обеспечивали «полноценного» протекания процесса растворения нецеллюлозных компонентов; при $C_{\text{NaOH}} = 20$ г/л (образец 3) можно получать полуцеллюлозу с выходом 42,1%; полученный продукт имеет влажность 3,0% и зольность 0,87%; содержание α -целлюлозы достигало 90,1%, степень полимеризации такого продукта являлась высокой и составляла СП = 1250;

- увеличение концентрации NaOH (C_{NaOH}) с 20 до 25 и 30% (образцы 4 и 5) приводило к снижению выхода целлюлозы с 42,1 (образец 3) до 36,9 и 32,2% соответственно за счет роста скорости реакции гидролиза ее макромолекул; сопровождающееся снижением степени полимеризации с 1250 до 1040 (на 17%) и более (до 840, что составляет 33%) являлось нежелательным из-за снижения бумагообразующих свойств полученного волокнистого полуфабриката и, как следствие, ограничение области его применения в технологии бумаги и картона. Получено, что увеличение C_{NaOH} способствовало увеличению растворимости золь неорганического происхождения и являлось одной из причин снижения зольности с 0,87% в образце 3 до 0,81 и 0,79% в образцах 4 и 5 соответственно;

- при снижении температуры со 150°C (образец 8) до 140°C (образец 7) и 130°C (образец 6) не обеспечивалось «полноценное» растворение нецеллюлозных компонентов, поэтому при $t < 150^\circ\text{C}$ исходное сырье сохраняло свой внешний волокнистый вид и не диспергировалось;

- при увеличении температуры со 150°C (образец 8) до 160°C (образец 9) и 170°C (образец 10) качественные показатели целлюлозосодержащих продуктов заметно ухудшались за счет увеличения деструкции целлюлозы, что являлось нежелательным, поэтому при $C_{\text{NaOH}} = 20$ г/л предпочтительной температурой натронной варки являлась $t = 150^\circ\text{C}$;

- при химической переработке однолетних растений в течение 1,0 ч (образец 11) и 1,5 ч (образец 12) происходило только частичное удаление нецеллюлозных компонентов (в особенности лигнин), поскольку за это время ($\tau \leq 1,5$ ч) процесс делигнификации протекал только частично; получено, что при $\tau = 2,0$ ч (образец 13) в результате удаления нецеллюлозных компонентов измельченное сырье рассыпалось, образуя целлюлозную массу с выходом 42,1%, а при $\tau = 2,5$ ч (образец 14) и $\tau = 3,0$ ч (образец 15) происходило ухудшение

свойств полученных целлюлозосодержащих продуктов; об этом свидетельствовало снижение выхода с 42,1 до 39,6 и 36,8% соответственно, а также уменьшение степени полимеризации с 1250 (образец 13) до 1100 (образец 14) и 890 (образец 15).

Следует отметить, что данные табл. 3 позволяют осуществить сравнение свойств полученных целлюлозосодержащих продуктов при использовании рекомендуемого способа получения полуцеллюлозы ($C_{\text{NaOH}} = 20$ г/л, $t = 150^\circ\text{C}$ и $\tau = 2,0$ ч) с другими способами, когда происходило изменение C_{NaOH} , t и τ и исследования проводили по этапам 1, 2 и 3 соответственно.

Таким образом, предпочтительными условиями химической переработки (натронной варки) стеблей топинамбура *Helianthus tuberosus* L. являлись следующие параметры: концентрация варочного раствора $C_{\text{NaOH}} = 20$ г/л, температура $t = 150^\circ\text{C}$ и продолжительность $\tau = 2,0$ ч. Полученный целлюлозосодержащий продукт имел выход 42,1%, его влажность составляла 3,0%, зольность – 0,87%. Он содержал значительное количество α -целлюлозы (90,1%) и имел достаточно высокую степень полимеризации – 1250. Свойства полученного продукта свидетельствуют о том, что он представляет собой полуцеллюлозу.

Такой целлюлозосодержащий продукт имеет практический интерес для бумажной и картонной промышленности. Одним из перспективных областей использования данного продукта, полученного в виде полуцеллюлозы, являются такие массовые виды продукции, как мешочная бумага, бумага-основа и картон-основа для гофрирования, а также различные виды картона технического назначения.

Заключение. Получены целлюлозосодержащие продукты (целлюлозы и полуцеллюлозы) по энергосберегающей технологии с использованием натронного способа химической переработки древесного сырья (щепы сосны) и однолетних растений (стеблей топинамбура *Helianthus tuberosus* L.). Варочные растворы отличались содержанием активной щелочи NaOH (C_{NaOH}). Эффективность процесса делигнификации повышали путем изменения температуры варочного процесса (t) и его продолжительности (τ). Свойства полученных продуктов характеризовали стандартными показателями:

выход (В), содержание компонентов (α -целлюлозы (Ц), лигнина (Л), смол и жиров (СЖ)), перманганатная жесткость (ПЖ), влажность (Вл), зольность (З) и степень полимеризации (СП). Эти показатели сравнивали с показателями сульфатной целлюлозы, полученной по стандартному графику варки при следующих условиях: $30 \leq C_{\text{NaOH}} \leq 60$ г/л, $t = 170^\circ\text{C}$ и $6,0 \leq \tau \leq 7,0$ ч.

Образцы целлюлозы получали при следующих условиях химической переработки древесного сырья (щепы сосны): $30 \leq C_{\text{NaOH}} \leq 60$ г/л, $155 \leq t \leq 160^\circ\text{C}$ и $4,5 \leq \tau \leq 5,0$ ч. Установлено, что они отличались выходом ($38,5 \leq В \leq 65,0\%$), перманганатной жесткостью ($76 \leq \text{ПЖ} \leq 133$) и степенью полимеризации ($2350 \leq \text{СП} \leq 3800$), а также компонентным составом ($0,91 \leq З \leq 1,13\%$, $0 \leq \text{ЖС} \leq 0,26\%$, $83,3 \leq Ц \leq 89,3\%$). Полученные целлюлозосодержащие продукты представляют собой технические виды целлюлозы: жесткую (образец 1), нормальной (образец 2) и средней (образец 3) жесткости, а также мягкую (образец 4).

Предложены следующие направления их практического использования на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности: образец 1 – для тароупаковочных видов картона; образец 2 – для бумаги мешочной, оберточной, упаковочной и других технических видов бумаги; образец 3 – для электротехнических и технических видов бумаги и картона; образец 4 – для производства впитывающих видов бумаги.

Образцы полуцеллюлозы, полученные путем химической переработки стеблей топинамбура *Helianthus tuberosus* L. при $10 \leq C_{\text{NaOH}} \leq 30$ г/л, $130 \leq t \leq 170^\circ\text{C}$ и $2,0 \leq \tau \leq 3,0$ ч, отличались выходом ($15,0 \leq В \leq 42,1\%$), степенью полимеризации ($870 \leq \text{СП} \leq 1340$) и компонентным составом ($3,0 \leq \text{Вл} \leq 3,5\%$, $0,79 \leq З \leq 0,90\%$, $87,0 \leq Ц \leq 91,6\%$). Установлено, что предпочтительными условиями получения полуцеллюлозы по натронному способу варки являются следующие: $C_{\text{NaOH}} = 20$ г/л, $t = 150^\circ\text{C}$ и $\tau = 2,0$ ч, что позволило обеспечить такие показатели ее качества, как $В = 42,1\%$, $\text{Вл} = 3,0\%$, $З = 0,87\%$, $Ц = 90,1\%$ и $\text{СП} = 1250$.

Полученная полуцеллюлоза представляет практический интерес для бумажной и картонной промышленности. Одной из перспективных областей использования этого продукта являются такие массовые виды бумажной и картонной продукции, как мешочная бумага, бумага-основа и картон-основа для гофрирования, а также различные виды картона технического назначения.

Список литературы

1. Технология целлюлозно-бумажного производства. Производство полуфабрикатов // Политехника. URL: <http://studmed.ru/vniib.htm> (дата обращения: 12.02.2025).
2. Черная Н. В., Колесников В. Л., Жолнерович Н. В. Технология производства бумаги и картона. Минск: БГТУ, 2013. 453 с.
3. Черная Н. В. Технология производства сульфитной целлюлозы. Минск: БГТУ, 2012. 351 с.

4. Черная Н. В., Жолнерович Н. В. Технология производства щелочной целлюлозы: в 2 ч. Минск: БГТУ, 2015. Ч. 1. 268 с.
5. Черная Н. В., Жолнерович Н. В. Технология производства щелочной целлюлозы: в 2 ч. Минск: БГТУ, 2015. Ч. 2. 205 с.
6. Черная Н. В., Жолнерович Н. В. Технология щелочной целлюлозы: регенерация химикатов, очистка и рекуперация промышленных выбросов: в 2 ч. Минск: БГТУ, 2017. Ч. 1. 171 с.
7. Черная Н. В., Жолнерович Н. В. Технология щелочной целлюлозы: регенерация химикатов, очистка и рекуперация промышленных выбросов: в 2 ч. Минск: БГТУ, 2017. Ч. 2. 130 с.
8. Черная Н. В., Жолнерович Н. В. Технология щелочной целлюлозы. Минск: БГТУ, 2014. 268 с.
9. Черная Н. В., Жолнерович Н. В., Чубис П. А. Технология сульфитной и сульфатной целлюлозы. Минск: БГТУ, 2011. 189 с.
10. Особенности надмолекулярных структур целлюлоз, полученных из топинамбура (*Helianthus tuberosus* L.) и древесины тополя / Г. Р. Рахманбердиев [и др.] // Химия и химическая технология. 2008. № 2. С. 40–43.
11. Влияние процесса предсозревания целлюлозы из топинамбура на ее фракционный состав / Г. Р. Рахманбердиев [и др.] // Химия и химическая технология. 2009. № 4. С. 57–58.
12. Изучение рассеяния света в растворах водорастворимой карбоксиметилцеллюлозы методом диаграммы Зимма / М. А. Касымджанов [и др.] // Химия и химическая технология. 2009. № 2. С. 42–44.
13. Рахманбердиев Г. Р., Муродов М. М., Хусенов А. Ш. Технологии получения целлюлозы путем комплексной переработки центрально-азиатского тополя и растения топинамбура // Химия и химическая технология. 2016. Спец. выпуск. С. 51–58.
14. Рахманбердиев Г. Р., Ибрагимходжаев А. М., Арсланов Ш. С. Получение целлюлозы из стеблей однолетних растений «Топинамбур» // Ресурс и энергосбережение в целлюлозно-бумажной промышленности и городском коммунальном хозяйстве: сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2005. С. 68.
15. Получение целлюлозы из стеблей однолетнего растения «Топинамбур» / Г. Р. Рахманбердиев [и др.] // Междунар. конф. хим. технол.: тез. докл. Москва, 2007. Т. 5. С. 159–160.
16. Рахманбердиев Г. Р., Кадиров О. Ш., Ибрагимходжаев А. М. Целлюлоза из стеблей топинамбура пригодная для дальнейших химических переработок // Актуальные проблемы химии высокомолекулярных соединений: тез. докл. Республ. науч.-практ. конф. Бухара, 2010. С. 64–66.

References

1. The technology of pulp and paper production. Production of semi-finished products. *Politekhnik* [Polytechnic]. Available at: <http://studmed.ru/vniib.htm> (accessed 12.02.2025) (In Russian).
2. Chernaya N. V., Kolesnikov V. L., Zholnerovich N. V. *Tekhnologiya proizvodstva bumagi i kartona* [Technology of paper and cardboard production]. Minsk, BGTU Publ., 2013. 453 p. (In Russian).
3. Chernaya N. V. *Tekhnologiya proizvodstva sul'fitnoy tsellyulozy* [Technology of production of sulphite pulp]. Minsk, BGTU Publ., 2012. 351 p. (In Russian).
4. Chernaya N. V., Zholnerovich N. V. *Tekhnologiya proizvodstva shchelochnoy tsellyulozy* [Alkaline cellulose production technology]. Minsk, BGTU Publ., 2015. Part 1. 268 p. (In Russian).
5. Chernaya N. V., Zholnerovich N. V. *Tekhnologiya proizvodstva shchelochnoy tsellyulozy* [Alkaline cellulose production technology]. Minsk, BGTU Publ., 2015. Part 2. 205 p. (In Russian).
6. Chernaya N. V., Zholnerovich N. V. *Tekhnologiya shchelochnoy tsellyulozy: regeneratsiya khimikatov, ochildka i rekuperatsiya promyshlennykh vybrosov* [Alkaline Pulp Technology: Chemical Recovery, Industrial Emissions Treatment and Recovery]. Minsk, BGTU Publ., 2017. Part 1. 171 p. (In Russian).
7. Chernaya N. V., Zholnerovich N. V. *Tekhnologiya shchelochnoy tsellyulozy: regeneratsiya khimikatov, ochildka i rekuperatsiya promyshlennykh vybrosov* [Alkaline Pulp Technology: Chemical Recovery, Industrial Emissions Treatment and Recovery]. Minsk, BGTU Publ., 2017. Part 2. 130 p. (In Russian).
8. Chernaya N. V., Zholnerovich N. V. *Tekhnologiya shchelochnoy tsellyulozy* [Alkaline cellulose technology]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 268 p. (In Russian).
9. Chernaya N. V., Zholnerovich N. V., Chubis P. A. *Tekhnologiya sul'fitnoy i sul'fatnoy tsellyulozy* [Technology of sulphite and sulphate pulp]. Minsk, BGTU Publ., 2011. 189 p. (In Russian).
10. Rakhmanberdiev R. G., Sidikov A. S., Ibragimkhodzhaev A. M., Xusenov A. Sh. Peculiarities of supramolecular structures of celluloses obtained from jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) and poplar wood. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Chemistry and Chemical Technology], 2008, no. 2, pp. 40–43 (In Russian).

11. Rakhmanberdiev G. R., Murodov M. M., Kadyrov O. Sh., Ibragimkhodzhaev A. M. The influence of the process of prematuration of jerusalem artichoke cellulose on its fractional composition. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Chemistry and Chemical Technology], 2009, no. 4, pp. 57–58 (In Russian).
12. Kasimdzhanov M. A., Kaziraimov A. M., Rakhmanberdiev G. R., Ibragimkhodzhaev A. M., Ernazarov Sh. N. Study of light scattering in solutions of water-soluble carboxymethyl cellulose by the Zimm diagram method. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Chemistry and Chemical Technology], 2009, no. 2, pp. 42–44 (In Russian).
13. Rakhmanberdiev G. R., Murodov M. M., Khusenov A. Sh. Technologies for obtaining cellulose through complex processing of Central Asian poplar and jerusalem artichoke plant. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Chemistry and Chemical Technology], 2016, special edition, pp. 51–58 (In Russian).
14. Rakhmanberdiev G. R., Ibragimkhodzhaev A. M., Arslanov Sh. S. Obtaining cellulose from the stems of annual plants “Jerusalem artichoke”. *Resurs i energosberezheniye v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti i gorodskom kommunal'nom khozyaystve: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Resource and energy saving in the pulp and paper industry and municipal utilities: collection of abstracts of the International Scientific and Practical conference]. St. Petersburg, 2005. P. 68 (In Russian).
15. Rakhmanberdiev G. R., Arslanov Sh. S., Ibragimkhodzhaev A. M., Tillashaikhov M. S. Obtaining cellulose from the stems of the annual plant Jerusalem artichoke. *Mezhdunarodnaya konferentsiya khimicheskoy tekhnologii: tezisy dokladov* [International Conference of Chemical Technology: abstracts of reports]. Moscow, 2007, vol. 5, pp. 159–160 (In Russian).
16. Rakhmanberdiev G. R., Kadirov O. Sh., Ibragimkhodzhaev A. M. Jerusalem artichoke stem cellulose suitable for further chemical processing. *Aktual'nyye problemy khimii vysokomolekulyarnykh soyedineniy: tezisy dokladov Respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of chemistry of high-molecular compounds: abstracts of reports of the Republican Scientific and Practical conference]. Bukhara, 2010, pp. 64–66 (In Russian).

Информация об авторах

Черная Наталья Викторовна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: chornaya@belstu.by

Герман Наталия Александровна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, ул. Республика Беларусь). E-mail: herman_n@belstu.by

Рахманбердиев Гаффар Рахманбердиевич – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры технологии целлюлозы и деревообработки. Ташкентский химико-технологический институт (ул. Навои, 32, 100011, г. Ташкент, Республика Узбекистан). E-mail: rgaffar@mail.ru

Хусенов Арслонназар Шерназарович – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии целлюлозы и деревообработки. Ташкентский химико-технологический институт (ул. Навои, 32, 100011, г. Ташкент, Республика Узбекистан). E-mail: khusenov_82@mail.ru

Information about the authors

Chernaya Natal'ya Viktorovna – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chornaya@belstu.by

Herman Natalia Aleksandrovna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: herman_n@belstu.by

Rakhmanberdiev Gaffar Rakhmanberdiyevich – DSc (Chemical), Professor, Professor, the Department of Technology of Cellulose and Woodworking. Tashkent Chemical Technological Institute (32 Navoi str., 100011, Tashkent, Republic of Uzbekistan). E-mail: rgaffar@mail.ru

Xusenov Arslonnazar Shernazarovich – DSc (Chemical), Professor, Head of the Department of Technology of Cellulose and Woodworking. Tashkent Chemical Technological Institute (32 Navoi str., 100011, Tashkent, Republic of Uzbekistan). E-mail: khusenov_82@mail.ru

Поступила 15.06.2025