

И.С. Содиков, Н.В. Щербак

**ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ
СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТОГО ПОЛУФАБРИКАТА
ИЗ СТЕБЛЕЙ ХЛОПЧАТНИКА
НАТРОННЫМ СПОСОБОМ ВАРКИ**

Введение. Развитие мировой целлюлозно-бумажной промышленности в последние десятилетия сопровождается ростом экологических и экономических вызовов. Основные из них включают дефицит древесного сырья, увеличение объемов сельскохозяйственных отходов и необходимость минимизации выбросов углерода. В этих условиях особую актуальность приобретает использование альтернативных, возобновляемых источников сырья, таких как стебли хлопчатника [Fahmy et al., 2017]. Ежегодно в мире образуется около 50 млн т стеблей хлопчатника, которые в основном утилизируются сжиганием, что приводит к выбросам парниковых газов. Однако исследования показывают, что благодаря высокому содержанию целлюлозы (до 50%) и низкому содержанию лигнина стебли хлопчатника могут успешно использоваться для производства целлюлозно-бумажной продукции, в том числе упаковочных материалов [Jimenez, Rodríguez, 2010]. Спрос на целлюлозу стабильно высок и продолжает расти, что обусловлено развитием электронной коммерции (рост потребности в упаковке) и тенденциями устойчивого развития (спрос на биоразлагаемые материалы). Объем рынка бумажной упаковки в 2025 г. превысил 403,73 млрд долларов США и, по прогнозам, к 2035 г. достигнет 621,01 млрд долларов США, демонстрируя среднегодовой темп роста около 4,4% в течение прогнозируемого периода (с 2026 по 2035 гг.). Рост мирового потребления бумаги и упаковочных материалов требует увеличения объемов производства целлюлозы, что приводит к интенсивной вырубке лесов [Отчет..., 2025]. Использование стеблей хлопчатника как возобновляемого ресурса позволяет решить проблему дефицита древесного сырья, снизить экологическую нагрузку на окружающую среду и повысить экономическую эффективность производства [Eugenio et al., 2019]. Стебли хлопчатника состоят из коры (22–27%) и древесной части (73–78%) с содержанием целлюлозы до 50%, лигнина около 13–17% и пентозанов 20–25%. По своим свойствам волокна хлопчатника

схожи с древесными волокнами лиственных пород, что делает их подходящими для целлюлозно-бумажного производства [Prakash et al., 2024].

Стебли хлопчатника представляют собой перспективный источник сырья для бумажной промышленности в хлопкопроизводящих странах. Их использование позволяет решить ряд экологических, экономических и социальных проблем, обеспечить переработку сельскохозяйственных отходов и сокращение выбросов углекислого газа. Исследования в этой области подтверждают возможность создания эффективных и экологически устойчивых технологий для переработки стеблей хлопчатника [Tarig et al., 2012; Lami, 2021].

Недревесное сырье, такое как солома, кукурузные и хлопковые стебли, обладает рядом особенностей, влияющих на свойства получаемой целлюлозы. Важнейшими параметрами являются длина волокон, содержание целлюлозы, лигнина и пентозанов, а также наличие минеральных примесей, таких как кремнезем. Исследования показывают, что высокое содержание α -целлюлозы положительно влияет на выход полуфабриката, в то время как лигнин оказывает обратное влияние [Ferdous et al., 2021].

Одним из наиболее распространенных методов варки недревесного сырья является натронный способ, основанный на использовании раствора едкого натрия (NaOH) без добавления сернистых соединений. Данный метод позволяет эффективно отделить лигнин и получить целлюлозосодержащий полуфабрикат. Исследования показывают, что содержание лигнина и гемицеллюлоз в сырье существенно влияет на эффективность варки. Например, у волокнистых материалов с высоким содержанием пентозанов и низким уровнем лигнина выход полуфабриката оказывается выше [Abd El-Sayed et al., 2020; Ferdous et al., 2021].

Выход полуфабриката зависит от химического состава сырья и параметров варки. В исследовании [Ferdous et al., 2021] было выявлено, что содержание α -целлюлозы и холоцеллюлозы (holocellulose) положительно коррелирует с выходом целлюлозы. В то же время содержание лигнина оказывает отрицательное влияние. Так, при натронной варке различных видов недревесного сырья выход полуфабриката варьировался от 30% до 65%, а качество полученной целлюлозы зависело от содержания примесей и степени очистки [Abd El-Sayed et al., 2020].

При этом сохраняются проблемы при переработке недревесного растительного сырья: вариативность химического состава сырья (лигнин/пентозаны/зола), склонность к накипеобразованию из-за кремнезёма, повышенные нагрузки на щелочное восстановление и утилизацию чёрного щёлока, а также необходимость тонкой настройки условий варки для балансировки выхода,

числа Каппа и прочностных показателей. Современные исследования предлагают решения через кислородные стадии, предгидролиз, использование «зелёных» растворителей и оптимизацию реакторов [Lee et al., 2022].

Длина волокон является ключевым параметром, определяющим механические свойства бумаги. Например, исследование показало, что у целлюлозы из недровесного сырья с высокой гибкостью волокон наблюдается улучшенная прочность на разрыв и разрывная длина [Ferdous et al., 2021]. В то же время более толстые стенки волокон могут отрицательно влиять на способность бумаги к формированию прочной структуры.

Использование недровесного сырья в целлюлозно-бумажной промышленности позволяет снизить нагрузку на лесные ресурсы и уменьшить углеродный след производства. Однако необходимо учитывать вопросы сбора и транспортировки сырья, а также эффективную переработку отходов, включая извлечение кремнезема, характерного для некоторых видов недровесного сырья [Abd El-Sayed et al., 2020].

В ходе исследования были проанализированы публикации, посвящённые получению целлюлозы из хлопчатниковых стеблей различного происхождения [Ali, Byrd, 2001; Akgül, Tozlu, 2009; Tarig et al., 2012]. В большинстве работ основное внимание уделяется сортам хлопчатника, произрастающим в Египте, США или Судане [Ali, Byrd, 2001; Akgül, Tozlu, 2009; Tarig et al., 2012]. Отличительной особенностью настоящего исследования является использование узбекского сорта хлопчатника, характерного для агроэкологических условий Республики Узбекистан.

В ряде зарубежных публикаций для оптимизации процесса варки применялись модифицированные методы: сода-антрахиноновый (soda-AQ), сода-аминовый, щелочная этаноловая варка [El-Saied et al., 1984; Ali, Byrd, 2001; Akgül, Tozlu, 2009] – что предполагает дополнительное использование реагентов (AQ, этанол, амин) для повышения выхода целлюлозы и качества волокон. К примеру, при сода-AQ процессе отмечаются более низкие числа Каппа и улучшенные механические свойства, однако возрастает сложность технологии и себестоимость [Ali, Byrd, 2001].

В настоящей работе применён классический натронный способ с использованием только гидроксида натрия, отличающийся простотой. Режимы варки отличались по концентрации NaOH (17-20%), гидромодулю, температуре и длительности варки. В международных источниках чаще исследовались условия с более высокой концентрацией щелочи (до 50%) [Ali, Byrd, 2001; Akgül, Tozlu, 2009], а также с добавлением антрахинона, что позволило получить низкие числа Каппа (9–10), однако выход полуфабриката снижался до 29-33%, требуя дополнительных затрат [Akgül, Tozlu, 2009].

Таким образом, результаты отличаются от ранее опубликованных работ уникальной комбинацией исходного сырья узбекского сорта хлопчатника и применяемых режимов натронной варки, что обеспечивает учёт региональных особенностей и экономическую целесообразность производства целлюлозы [Ali, Byrd, 2001; Akgül, Tozlu, 2009; Tarig et al., 2012].

Следует отметить, что при натронной варке недревесного сырья образуется меньшее количество вредных выбросов по сравнению с сульфитной или крафт-варкой древесины, что повышает экологическую привлекательность данного метода [Морозова, 2018].

Несмотря на многочисленные исследования, остаются нерешёнными ряд вопросов, касающихся оптимизации параметров натронной варки с целью повышения выхода целлюлозы и снижения содержания остаточного лигнина. Отсутствует единая методология оценки влияния анатомических особенностей стеблей хлопчатника разных сортов на эффективность варки. Кроме того, в отечественной литературе наблюдается дефицит свежих публикаций (после 2010 г.) по данной теме, в то время как международные источники предоставляют больше информации по аналогичной переработке рисовой соломы, бамбука [Zhang et al., 2023] и льна, чем по хлопчатнику. В работах зарубежных авторов, например, [Hellstén et al., 2013] упоминаются способы регенерации щёлочи и повторного использования растворов, что в российских источниках представлено фрагментарно. Несмотря на недостаточность изучения вопроса утилизации отработанных щелоков при варке недревесного сырья, в данной работе такая задача не стояла.

Цель данных исследований – установить закономерность и выявить критические значения влияния расхода щёлочи при натронной варке на выход и качество целлюлозы и пригодность ее использования в композиции упаковочных бумаг.

Материалы и методика исследования. Исследование волокнистых полуфабрикатов и их получение из стеблей хлопчатника выполнялось на оборудовании Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск.

В качестве исходного образца использовали стебли хлопчатника (*Gossypium hirsutum* L.), привезенного из Узбекистана, скороспелого сорта С-6524, распространенного в Ташкентской области.

В исследовании использовались неокоренные, предварительно измельченные до 4-5 см длиной стебли хлопчатника. В предыдущих наших работах были представлены данные по сульфатной варке, где установлено, что неокоренные стебли хлопчатника дают снижение выхода целлюлозы после

варки на 20%, а показателей качества полуфабриката на 8-30%, по сравнению с предварительно окоренными стеблями хлопчатника, что обосновано отличием компонентного состава коры, меньшим содержанием в ней целлюлозы и, как следствие, большим количеством непровара и сора [Содииков, Щербак, 2023, 2024]. С учётом полученного низкого уровня сопротивления сжатия кольца сульфатной целлюлозы из стеблей хлопчатника в данных исследованиях было принято решение о проведении натронной варки.

Натронную варку проводили в лабораторном автоклаве при следующем режиме:

- расход NaOH – от 10 до 50% от массы абсолютно сухого сырья;
- гидромодуль – 10:1;
- температура пропитки – 110°C, продолжительность пропитки – 25 мин, конечная температура варки – 155°C, продолжительность стоянки на конечной температуре – 120 мин.

В стеблях хлопчатника определяли содержание целлюлозы по азотно-спиртовому методу (метод Кюршнера) [Оболенская и др., 1991; Kürschner, Hoffer, 1929].

В стеблях и полуфабрикате после варки определяли:

- содержание лигнина, ГОСТ 11960–79;
- содержание экстрактивных веществ, ГОСТ 6841–77;
- зольность, ГОСТ 18461–93;
- влажность, ГОСТ 50316–92.

В полуфабрикате после варки дополнительно определяли выход и число Каппа в соответствии с методикой ISO 302:2004 и соответствующей ей методикой ГОСТ 10070–74.

После варки полуфабрикаты промывали до нейтральной реакции и подвергали размолу с использованием мельницы Йокро; центробежный размалывающий аппарат (ЦРА) стандартизован в соответствии с ISO 5264–3.

Для оценки показателей качества полученную целлюлозу размалывали в ЦРА до достижения степени помола (СП) 30 °ШР. Изготовление лабораторных образцов бумаги массой 100 г/м² осуществлялось на листоотливном аппарате «Рapid-Кетен».

Подготовка проб и физико-механические испытания проводились по стандартным методикам в соответствии с требованиями, регламентированными для картона для плоских слоев гофрированного картона по ГОСТ Р 57207–2008 «Картон для плоских слоев гофрированного картона», ГОСТ Р ИСО 9895–2013, ГОСТ 10711-97 «Бумага и картон. Метод определения разрушающего усилия при сжатии кольца (RCT)», ГОСТ Р ИСО 2759–2017

«Картон. Метод определения сопротивления продавливанию», ГОСТ Р ИСО 9895–2013 «Бумага и картон. Определение сопротивления сжатию. Метод испытания на коротком расстоянии между зажимами (SCT)». Перед испытаниями образцы подвергались кондиционированию по ГОСТ Р ИСО 187–2012.

Для определения структурно-морфологических характеристик волокон использовали анализатор Fiber Tester фирмы Lorentzen&Wettre.

Результаты исследования. Был проведён сравнительный анализ компонентного состава стеблей хлопчатника разного происхождения (табл. 1). Данные по стеблям хлопчатника из Египта, США и Китая взяты из открытых источников [Ali, Byrd, 2001].

Таблица 1

Компонентный состав стеблей хлопчатника разного происхождения

The component composition of cotton stalks of different origin

Наименование	Узбекистан	Египет	США	Китай
Экстрактивные вещества, %	1,75	2,93*	3,03*	-
Целлюлоза, %	49,4	48,8	42,2	34,7
Лигнин, %	21,4	22,5	26,9	20,9
Зольность, %	4,6	1,8	1,1	1,9

Примечание: * – спирто-бензольный растворитель [Ali, Byrd, 2001]

Выявлены основные отличия компонентного состава узбекских стеблей хлопчатника: повышенное содержание целлюлозы (49,4%) при меньшем количестве лигнина (21,4%) и экстрактивных веществ (1,75%) по сравнению с египетским, американским и китайским делают стебли хлопчатника узбекского происхождения более пригодными для получения волокнистого полуфабриката для бумаг.

В процессе натронной варки были получены волокнистые полуфабрикаты, отличающиеся по свойствам при варьировании расхода NaOH. Как видно из табл. 2, при увеличении расхода NaOH от 10 до 50% наблюдалось закономерное снижение выхода полуфабриката с 50,2 до 29% и содержания остаточного лигнина с 20,3 до 9,6%, что свидетельствует об эффективной делигнификации.

Коэффициент парной корреляции всех определяемых параметров (за исключением содержания экстрактивных веществ) от расхода щелочи выше по модулю 0,90, что подтверждает высокую достоверность полученных экспериментальных данных.

Таблица 2

Результаты натронной варки стеблей хлопчатника**The results of soda process of cotton stalks**

Расход NaOH, %	Выход, %	Непровар, %	Число Каппа, ед.	Экстрактивные, %	Содержание лигнина, %	Зольность, %	Содержание остаточного NaOH, г/л
10	50	10,0	128	0,16	20,3	2,6	1,10
15	46	9,2	116	0,22	19,8	2,3	4,34
17	45	7,7	112	0,13	18,1	2,2	6,40
20	41	4,5	106	0,04	16,2	2,2	6,98
30	34	0,3	81	0,08	13,8	2,2	—*
40	33	0	60	0,10	10,4	2,0	—
50	29	0	60	0,12	9,6	1,8	—
r^{**}	−0,97	−0,91	−0,98	−0,35	−0,98	−0,92	0,98

Примечание: * — не контролировалось вследствие завышенных расходов NaOH на варку;
 ** — коэффициент парной корреляции при коэффициенте достоверности (p), равном 0,05

Определение компонентного состава полуфабрикатов показало, что увеличение расхода NaOH в диапазоне 17-40% не оказывает значительного влияния на изменение содержания экстрактивных веществ и зольности. При этом общий уровень содержания экстрактивных веществ невысокий, условно принимаемый за постоянный уровень в указанном диапазоне варьирования щелочи, а колебания абсолютных значений можно проигнорировать ввиду эффекта малых чисел.

Исследование структурно-размерных и бумагообразующих свойств волокон (рис. 1, 2, табл. 3, 4) продемонстрировало закономерное снижение средней длины волокон и повышение доли мелочи при увеличении расхода щелочи вследствие повышения деструкции клеточной стенки целлюлозного волокна. Варьирование расхода щелочи в широком диапазоне от 10 до 50% выявило несимбатные закономерности изменения свойств волокна. Так, средняя длина и ширина волокна при повышении расхода NaOH снижаются линейно, в то же время доля мелочи растет нелинейно: резкий прирост мелочи наблюдается при расходе в 20%, дальнейшее повышение расхода NaOH к значимому приросту мелочи не приводит. Анализ данных структурно-размерных показателей волокна позволил установить отличие в поведении среднего индекса излома и грубости волокна. Наблюдаемое резкое изменение их значений при расходе щелочи в 50% свидетельствует о происходящих с клеточной стенкой изменениях, к которым оказались нечувствительны показатели

средней длины и ширина волокна. Данный факт позволяет выдвинуть предположение о недостаточной информативности общепринятых показателей средней длины, ширины волокна и доли мелочи для происходящих в процессах варки изменений клеточной стенки целлюлозы.

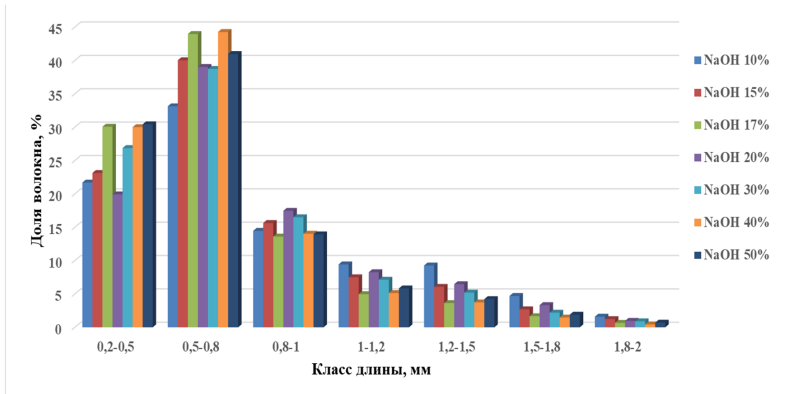


Рис. 1. Влияние расхода NaOH на фракционное распределение по длине волокна до размола

Fig. 1. The effect of NaOH consumption on fractional distribution along the fiber length

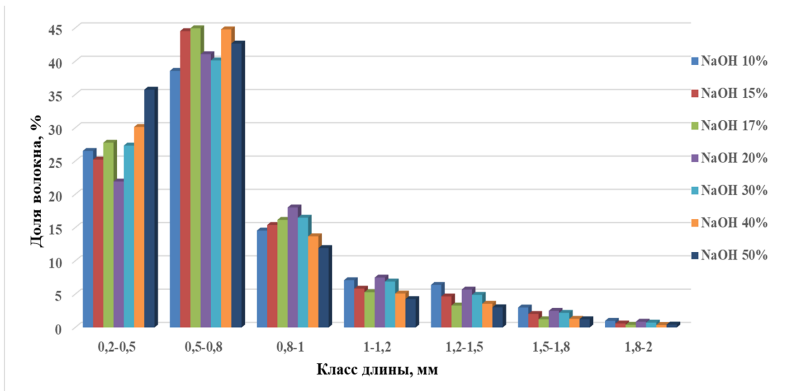


Рис. 2. Влияние расхода NaOH на фракционное распределение по длине волокна после размола СП 30°

Fig. 2. The effect of NaOH consumption on the fractional distribution along the fiber length after refining at 30°

Таблица 3

Исследование структурно-размерных показателей целлюлозных волокон до размола**Investigation of the structural and dimensional parameters of cellulose fibers**

Расход NaOH, %	Средняя длина, мм	Средняя ширина, мкм	Средний фактор формы, %	Грубость, мг/м	Средний угол излома, °	Средний индекс излома, °	Средняя длина сегмента, мм	Доля мелочи, %
10	0,93	26,3	88	237	47,6	1,51	0,71	4,2
15	0,82	25,0	89	179	47,6	1,31	0,66	4,4
17	0,86	24,6	89	157	47,7	1,31	0,69	4,3
20	0,79	23,4	90	140	44,5	1,43	0,58	7,2
30	0,77	23,6	88	122	47,9	1,59	0,61	7,5
40	0,68	21,7	89	103	48,0	1,61	0,56	7,6
50	0,72	21,0	87	88	49,5	2,16	0,53	7,8

Таблица 4

Исследование структурно-размерных показателей целлюлозных волокон после размола 30°ШР**Investigation of the structural and dimensional parameters of cellulose fibers after refining to 30°SR**

Расход NaOH, %	Средняя длина, мм	Средняя ширина, мкм	Средний фактор формы, %	Грубость, мг/м	Средний угол излома, °	Средний индекс излома, °	Средняя длина сегмента, мм	Доля мелочи, %
10	0,78	24,6	91	120	47,7	0,84	0,70	6,2
15	0,73	23,3	92	102	48,2	0,75	0,66	6,4
17	0,79	23,0	93	130	52,4	0,45	0,75	6,5
20	0,69	22,7	93	129	47,2	0,59	0,66	7,0
30	0,73	21,8	91	102	48,1	0,75	0,68	7,3
40	0,68	20,7	91	82	47,7	1,07	0,63	8,3
50	0,64	19,8	90	81	44,8	1,43	0,55	10,8

Выдвинутое предположение находит подтверждение в изменении структурно-размерных характеристик и после размола. Так, средняя длина, ширина волокна сохраняют тенденцию к снижению, но выравниваются по абсолютным значениям. Аналогичный тренд, но с повышением значений отмечается для доли мелкого волокна. При этом средний индекс излома и

грубость волокна после размола при расходе щелочи в 50% также имеют явные отличия значений, не укладывающиеся в общие тренды изменений.

В то же время фактор формы улучшается по сравнению с исходной целлюлозой после размола до степени помола 30 °ШР, что обусловлено повышенной способностью к набуханию клеточной стенки целлюлозного волокна. При этом уровень значений фактора формы можно считать постоянным независимо от расхода щелочи (табл. 3, 4).

Физико-механические испытания бумаги (табл. 5) показали, что максимальный уровень значений разрывной длины (4830 м), сопротивления продавливанию (328 кПа) и прочности при растяжении (4,77 кН/м) наблюдался при 40% расходе щелочи. Дальнейшее повышение расхода до 50% привело к резкому снижению большинства показателей качества. Это отражает отмеченный ранее тренд по изменению среднего индекса излома и грубости при расходе щелочи в 50%. Учитывая ведущие отраслевые практики, можно выделить удовлетворительный уровень качественных показателей, достигаемый при расходе 17–20% активной щелочи. Построение кривой «напряжение-деформация» (рис. 3) подтвердило полученные закономерности влияния расхода активной щелочи на качественные показатели образцов. Максимальное напряжение до разрушения отмечается при расходе в 40% щелочи, при этом удовлетворительный уровень деформативности (оценивает способность к удлинению) и прочности достигается уже при расходе 17–20%.

Таблица 5

Прочностные характеристики
Strength property

Наименование показателя	Расход активного щелока, %						
	10	15	17	20	30	40	50
Плотность, г/см ³	0,61	0,69	0,71	0,74	0,77	0,80	0,73
Толщина, мкм	159	138	136	134	123	124	133
Сопротивление продавливанию, кПа	154	199	231	253	285	328	242
Сопротивление разрушающему усилию при сжатии кольца, Н	154	156	158	161	160	165	122
Сопротивление сжатию на коротком расстоянии, кН/м	2,63	2,85	2,99	2,85	2,95	3,23	2,98
Разрывная длина, м	3525	4260	4350	4380	4250	4830	3560
Прочность при растяжении, кН/м	3,40	4,09	4,17	4,35	4,03	4,77	3,46
ТЕА, Дж/м ²	25,4	38,4	41,3	45,3	28,2	44,7	18,0
Удлинение, %	1,3	1,5	1,6	1,7	1,6	1,5	0,9

Примечание: ТЕА – энергия, затраченная при растяжении

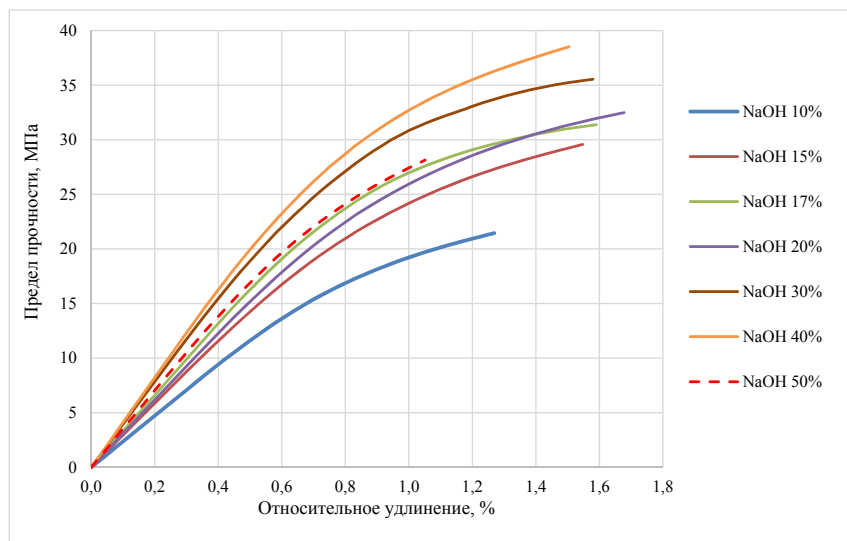


Рис. 3. Зависимости «напряжение–деформация»

Fig. 3. “Stress–strain” relations

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают возможность эффективного применения целлюлозы из стеблей хлопчатника, полученной натронной варкой, для производства картона. Варка при расходе NaOH в 17–20% приводит к снижению числа Каппа до 112–106 ед., что, несмотря на его относительно высокое значение, является допустимым для целлюлозных полуфабрикатов, применяемых при производстве упаковочных видов бумаги и картона. Установлено, что в интервале расхода NaOH в 17–20% достигается удовлетворительное сочетание выхода и прочностных характеристик целлюлозы для упаковочных видов бумаги.

Аналогичные значения приведены в исследованиях [Tarig et al., 2012; Fahmy et al., 2017], где целлюлозные полуфабрикаты из стеблей хлопчатника с числом Каппа до 120 демонстрировали удовлетворительные технологические и физико-механические свойства, позволяющие их эффективное использование в производстве упаковочных материалов.

Механические свойства бумаги, полученной из полуфабриката при NaOH 17–20%, соответствуют техническим условиям ведущих производителей тароупаковочных видов бумаги и картона:

- разрывная длина – 4350–4380 м,

- сопротивление продавливанию – 231-253 кПа,
- прочность при растяжении – 4,17-4,35 кН/м,
- SCT и RCT – также в допустимых пределах.

В ряде исследований [Ferdous et al., 2021] подчеркивается, что при производстве картона требуется сбалансированное соотношение прочности и способности к формованию, а также стабильность размеров при повышенной влажности. Образцы, полученные при расходе NaOH в 17%, демонстрируют длину волокна (до 0,69 мм), сопоставимую с длиной листовых целлюлозных волокон, производимых в промышленных масштабах из эвкалипта, осины, березы. Образующаяся при этих условиях доля мелочи (до 7,2%) также сопоставима с уровнем значений, характерных для производства листовых пород древесины. Отметим, что мелкое волокно положительно сказывается на образовании структуры и равномерности листа.

Проведенные исследования позволили опровергнуть ранее опубликованные результаты. Так, в работе [Abd El-Sayed et al., 2020] также показано, что при варке недревесного сырья увеличение расхода щелока свыше 20% даёт лишь умеренный прирост качества при снижении выхода на 10-20%.

В результате проведенных авторами исследований, представленных в данной работе, установлено, что применительно к стеблям хлопчатника скороспелого сорта С-6524, распространенного в Ташкентской области, прирост показателей качества при повышении расхода щелочи с 20 до 40% возможен до 22% для сопротивления продавливанию и 9-11% для показателей короткого сжатия и прочности при растяжении. При этом выход целлюлозы снижается на 8%. Это дает возможность направленно регулировать уровень качественных показателей получаемой целлюлозы варьированием расхода щелочи.

Заключение. Проведенные исследования позволили экспериментальным путем установить условия варки волокнистого полуфабриката из стеблей хлопчатника скороспелого сорта С-6524, распространенного в Ташкентской области, с высокими значениями числа Каппа для упаковочных и тароупаковочных бумажно-картонных изделий. Установлено, что целлюлоза, полученная из стеблей хлопчатника при натронной варке с расходом NaOH в 17–20% и продолжительностью варки в течение 2 ч, имеет повышенную жесткость, число Каппа – 106–112 ед. Полученный в данных условиях полуфабрикат имеет среднюю длину волокон 0,69-0,86 мм и долю мелочи 4,4–7,5%, что сопоставимо с показателями полуцеллюлозы из листовых пород древесины, традиционно применяемых для производства тароупаковочных видов бумаги и картона.

Прочностные показатели лабораторных образцов картона из натронной целлюлозы стеблей хлопчатника: разрывная длина до 4380 м, прочность на продавливание до 253 кПа – соответствуют техническим условиям ведущих производителей тароупаковочных видов бумаги и картона, что подтверждает пригодность ее использования в композиции тароупаковочных бумаг и картонов.

Экспериментально подтверждено положительное влияние расхода каустика при натронной варке на повышение показателей механической прочности целлюлозы. Установлен критический уровень расхода каустика. Максимум приходится на 40%, дальнейшее повышение расхода каустика приводит к резкому снижению всех показателей прочности вследствие чрезмерной деструкции клеточной стенки целлюлозного волокна.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Морозова Н.Ю. Экологические преимущества щелочной варки недревесного сырья // *Технология целлюлозы*. 2018. № 2. С. 21–25.

Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.

Отчет о размере, доле и прогнозе рынка бумажной упаковки до 2035 г. // Research Nester. 2025. URL: <https://www.researchnester.com/ru/reports/paper-packaging-market/6141> (дата обращения: 16.11.2025).

Содилов И.С., Щербак Н.В. Получение волокнистого полуфабриката из стеблей хлопчатника для упаковочных видов бумаг // *Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: мат. VII межд. науч.-техн. конф. имени профессора В.И. Комарова*. Архангельск, 2023. С. 286–289.

Содилов И.С., Щербак Н.В. Влияние расхода активной щелочи на изменение качественных показателей сульфатной целлюлозы из стеблей хлопчатника // *Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых-2024: мат. конф.* Архангельск, 2024. С. 616–618.

Abd El-Sayed E., El-Sakhawy M., Sakhawy M. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry // *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2020. Vol. 35. P. 1–10. DOI: 10.1515/nprrj-2019-0064.

Akgül M., Tozlu A. Comparison of soda and soda-AQ pulps from cotton stalks // *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100, no. 24. P. 6680–6684.

Ali M., Byrd M. Soda-AQ pulping of cotton stalks // *Pulping Conference. Proceedings of the Technical Association of the Pulp and Paper Industry*. 2001. P. 1–5.

El-Saied H., Nada A.M.A., El-Ashmawy A.E. Soda-anthraquinone pulping of whole cotton stalks // *Holzforschung*. 1984. Bd. 38, h. 3. S. 167–170. DOI: 10.1515/hfsg.1984.38.3.167.

Eugenio M.E., Ibarra D., Martín-Sampedro R., Espinosa E., Bascón I., Rodríguez A. Alternative raw materials for pulp and paper production in the concept of a lignocellulosic biorefinery // *Cellulose*. 2019. P. 1-26. DOI: 10.5772/intechopen.90041.

Fahmy Y., Fahmy T.Y.A., Mobarak F., El-Sakhawy M., Fadl M.H. Agricultural residues (wastes) for manufacture of paper, board, and miscellaneous products: Background overview and future prospects // *International Journal of ChemTech Research*. 2017. Vol. 10, no. 2. P. 424–448.

Ferdous T., Ni Y., Quaiyyum M., Uddin M., Jahan M. Non-wood fibers: Relationships of fiber properties with pulp properties // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, iss. 33. P. 21613–21622. DOI: 10.1021/acsomega.1c02933.

Hellstén S., Lahti J., Heinonen J., Kallioinen M. Purification process for recovering hydroxy acids from soda black liquor // *Chemical Engineering Research and Design*. 2013. Vol. 91, no. 12. P. 2765–2774. DOI: 10.1016/j.cherd.2013.06.001.

Jiménez L., Rodríguez A. Valorization of agricultural residues by fractionation of their components // *The Open Agricultural Journal*. 2010. Vol. 4. P. 125–134. DOI: 10.2174/1874331501004010125.

Kürschner K., Hoffer A. Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Cellulose in Hölzern und Zellstoffen // *Tech. Chem. Pap. Zellst. Fabr.* 1929. No. 26. S. 125–129.

Lami A.E. Pulp production from cotton stalks // *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*. 2021. Vol. 3, no. 1. P. 23–28. DOI: 10.33140/JTEFT.03.01.01.

Lee T.-J., Gwon J.-G., Youe W.-J., Oh Y., Ahn B.-J., Seo J.-H. Effect of soda-ethanol cooking with caustic extraction prior to bleaching on the properties of hardwood pulp // *BioResources*. 2022. Vol. 17, no. 2. P. 2884–2895. DOI: 10.15376/biores.17.2.2884-2895.

Prakash S., Radha R., Sharma K., Dhumal S., Senapathy M., Deshmukh V., Kumar M., Anitha T., Balamurugan V., Pandiselvam R., Kumar M. Unlocking the potential of cotton stalk as a renewable source of cellulose: A review on advancements and emerging applications // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 261. Art. no. 129456. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129456.

Tarig K., Omer S., Taha O., Shomeina S. Suitability of Sudanese cotton stalks for alkaline pulping with additives // *Iranica Journal of Energy and Environment*. 2012. Vol. 3, no. 2. P. 167-172.

Zhang Y., Xu Y., Pei Y., Yin X. Green liquor desilication via black liquor combustion process for bamboo pulping // *BioResources*. 2023. Vol. 18, no. 1. P. 733–747. DOI: 10.15376/biores.18.1.733-747.

References

Abd El-Sayed E., El-Sakhawy M., Sakhawy M. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2020, vol. 35, pp. 1–10. DOI: 10.1515/npprj-2019-0064.

Akgül M., Tozlu A. Comparison of soda and soda-AQ pulps from cotton stalks. *Bioresource Technology*, 2009, vol. 100, no. 24, pp. 6680–6684.

Ali M., Byrd M. Soda-AQ pulping of cotton stalks. *Pulping Conference. Proceedings of the Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 2001, pp. 1–5.

El-Saied H., Nada A.M.A., El-Ashmawy A.E. Soda-anthraquinone pulping of whole cotton stalks. *Holzforschung*, 1984, bd. 38, h. 3, ss. 167–170. DOI: 10.1515/hfsg.1984.38.3.167.

Eugenio M.E., Ibarra D., Martín-Sampedro R., Espinosa E., Bascón I., Rodríguez A. Alternative raw materials for pulp and paper production in the concept of a lignocellulosic biorefinery. *Cellulose*. 2019, pp. 1–26. DOI: 10.5772/intechopen.90041.

Fahmy Y., Fahmy T.Y.A., Mobarak F., El-Sakhawy M., Fadl M.H. Agricultural residues (wastes) for manufacture of paper, board, and miscellaneous products: Background overview and future prospects. *International Journal of ChemTech Research*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 424–448.

Ferdous T., Ni Y., Quaiyyum M., Uddin M., Jahan M. Non-wood fibers: Relationships of fiber properties with pulp properties. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, iss. 33, pp. 21613–21622. DOI: 10.1021/acsomega.1c02933.

Hellstén S., Lahti J., Heinonen J., Kallioinen M. Purification process for recovering hydroxy acids from soda black liquor. *Chemical Engineering Research and Design*, 2013, vol. 91, no. 12, pp. 2765–2774. DOI: 10.1016/j.cherd.2013.06.001.

Jiménez L., Rodríguez A. Valorization of agricultural residues by fractionation of their components. *The Open Agricultural Journal*. 2010, vol. 4, pp. 125–134. DOI: 10.2174/1874331501004010125.

Kürschner K., Hoffer A. Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Cellulose in Hölzern und Zellstoffen. *Tech. Chem. Pap. Zellst. Fabr.*, 1929, no. 26, ss. 125–129.

Lami A.E. Pulp production from cotton stalks. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 23–28. DOI: 10.33140/JTEFT.03.01.01.

Lee T.-J., Gwon J.-G., Youe W.-J., Oh Y., Ahn B.-J., Seo J.-H. Effect of soda-ethanol cooking with caustic extraction prior to bleaching on the properties of hardwood pulp. *BioResources*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 2884–2895. DOI: 10.15376/biores.17.2.2884-2895.

Morozova N.Yu. Environmental advantages of alkaline pulping of non-wood raw materials. *Pulp Technology*, 2018, no. 2, pp. 21–25. (In Russ.)

Obolenskaya A.V., Elnitskaya Z.P., Leonovich A.A. Laboratory works on chemistry of wood and cellulose. Moscow: Ekologiya, 1991. 320 p. (In Russ.)

Prakash S., Radha R., Sharma K., Dhumal S., Senapathy M., Deshmukh V., Kumar M., Anitha T., Balamurugan V., Pandiselvam R., Kumar M. Unlocking the potential of cotton stalk as a renewable source of cellulose: A review on advancements and emerging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, vol. 261, art. no. 129456. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129456.

Report on the size, share and forecast of the paper packaging market until 2035. *Research Nester*. 2025. URL: <https://www.researchnester.com/ru/reports/paper-packaging-market/6141>(accessed November 16, 2025). (In Russ.)

Sodikov I.S., Shcherbak N.V. Obtaining a fibrous semi-finished product from cotton stalks for packaging types of papers. *Problems of mechanics of pulp and paper materials*: proc. of the VII int. sci.-tech. conf. named after Professor V.I. Komarov. Arkhangelsk, 2023, pp. 286-289. (In Russ.)

Sodikov I.S., Shcherbak N.V. The effect of active alkali consumption on changes in the quality parameters of sulfate cellulose from cotton stalks. *Lomonosov Scientific readings for students, postgraduates and young scientists-2024*: mat. of the conf. Arkhangelsk, 2024, pp. 616-618. (In Russ.)

Tarig K., Omer S., Taha O., Shomeina S. Suitability of Sudanese cotton stalks for alkaline pulping with additives. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 167-172.

Zhang Y., Xu Y., Pei Y., Yin X. Green liquor desilication via black liquor combustion process for bamboo pulping. *BioResources*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 733–747. DOI: 10.15376/biores.18.1.733-747.

Материал поступил в редакцию 24.10.2025

Содилов И.С., Щербак Н.В. Получение и изучение свойств волокнистого полуфабриката из стеблей хлопчатника натронным способом варки // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 404–421. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.404-421

В статье рассматривается возможность получения волокнистого полуфабриката из стеблей хлопчатника узбекского происхождения сорта С-6524 натронным способом варки. Установлено влияние расхода гидроксида натрия на выход, компонентный состав и физико-механические свойства целлюлозы. В качестве сырья использованы неокоренные стебли хлопчатника, предварительно измельченные до 4–5 см длиной, с содержанием целлюлозы 49,4%, лигнина 21,4% и зольностью 4,6%. Варку проводили при расходе NaOH в 10–50%, гидромодуле 10:1, температуре 155 °С и продолжительности 120 мин. Установлено, что увеличение расхода щелочи приводит к снижению выхода полуфабриката с 50 до 29% и уменьшению содержания остаточного лигнина с 20,3 до 9,6%. Показано, что в диапазоне 17-40% содержание экстрактивных веществ и зольность изменяются незначительно. Выявлено снижение средней длины и ширины волокон и рост доли мелочи при увеличении расхода щелочи, а также изменение показателей, характеризующих состояние клеточной стенки. Максимальные прочностные характеристики бумаги достигаются при расходе NaOH в 40%, однако при 50% наблюдается их резкое снижение вследствие деструкции волокон. Установлено, что при расходе щелочи в 17-20% механические свойства бумаги,

полученной из полуфабриката, соответствуют техническим условиям ведущих производителей тароупаковочных видов бумаги и картона. Данный факт подтверждается экспериментальными значениями физико-механических характеристик качества: разрывная длина – 4350–4380 м, сопротивление продавливанию – 231–253 кПа, прочность при растяжении – 4,17–4,35 кН/м, SCT и RCT – также в допустимых пределах. Практическая значимость результатов заключается в возможности использования стеблей узбекского хлопчатника для производства упаковочного картона.

Ключевые слова: натронная варка, стебли хлопчатника, целлюлоза, упаковочный картон, картон-лайнер.

Sodikov I.S., Shcherbak N.V. Obtaining and studying the properties of a fibrous semi-finished product from cotton stems using the soda cooking method. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 404–421 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.404-421

The article examines the possibility of obtaining a fibrous semi-finished product from cotton stalks of Uzbek origin (variety S-6524) using the soda pulping process. The effect of sodium hydroxide consumption on pulp yield, chemical composition, and physical and mechanical properties is established. The raw material consisted of unbarked cotton stalks, pre-cut to 4–5 cm, with a cellulose content of 49.4%, lignin 21.4%, and ash content 4.6%. Pulping was carried out at a NaOH charge of 10–50%, a liquor-to-solid ratio of 10:1, a temperature of 155 °C, and a cooking time of 120 minutes. Increasing alkali consumption leads to a decrease in pulp yield from 50 to 29% and a reduction in residual lignin from 20.3 to 9.6%. In the range of 17–40%, the content of extractives and ash changes insignificantly. A decrease in fiber length and width and an increase in fines content are observed with increasing alkali consumption. Maximum strength properties are achieved at a NaOH charge of 40%, while at 50% a sharp decrease occurs due to fiber degradation. At 17–20% NaOH, the pulp provides a balance of yield and strength properties. The obtained paper demonstrates tensile length 4350–4380 m, bursting strength 231–253 kPa, and tensile strength 4.17–4.35 kN/m. The results confirm the suitability of cotton stalks for packaging board production.

Key words: soda cooking, cotton stalks, cellulose, packaging cardboard, liner cardboard.

СОДИКОВ Исмоил Сайфутдин угли – аспирант Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова. SPIN-код: 9971-7190. ORCID: 0000-0002-2537-360X.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: sodikovismoil@gmail.com

SODIKOV Ismoil S. – PhD student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. SPIN-code: 9971-7190. ORCID: 0000-0002-2537-360X.

163002. Severnoy Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: sodikovismoil@gmail.com

ЩЕРБАК Наталья Владимировна – заведующий кафедрой целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 7249-8934. ORCID: 0000-0002-7383-3826.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: n.sioeva@narfu.ru

SHCHERBAK Natalia V. – PhD (Technical), Head of the Department of Pulp & Paper and Forest Chemical Processing, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Associate Professor. SPIN-code: 7249-8934. ORCID: 0000-0002-7383-3826.

163002. Severnoy Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: n.sioeva@narfu.ru