

Получение Бумажной Массы Из Рисовой Соломы Энергоэффективным Методом

Урозова Дурданахон Давронжон кизи

Ферганский Государственный Технический Университет

E-mail: durdonakhonurozova@gmail.com

Казаков Яков Владимирович

Северный (Арктический) Федеральный Университет

Аннотация

В работе исследован способ получения бумажной массы из рисовой соломы с использованием мягкой технологии химического отстаивания. Рассматривались ключевые параметры процесса — температура, время обработки и состав раствора. Показано, что при щадящих условиях удаётся эффективно извлекать целлюлозу, одновременно переводя кремнезём в раствор. Также проведён экологический и экономический анализ технологии, который подтвердил её преимущества перед традиционными методами. Полученные данные могут быть применены при организации местного производства бумажной продукции из аграрных отходов, особенно в регионах с дефицитом древесины.

Ключевые слова рисовая солома, бумажная масса, предлагаемое сульфатное отстаивание, кремнезем, аграрные отходы, переработка сельскохозяйственных отходов, экологичные технологии, Узбекистан Ферганская долина.

Введения

Во всём мире возрастает интерес к переработке сельскохозяйственных отходов. Это связано с необходимостью рационального использования природных ресурсов, снижением вредного воздействия на окружающую среду и переходом к замкнутым производственным циклам — так называемой «циркулярной экономике». Аграрное производство даёт большие объёмы органических отходов, таких как солома, шелуха, мякоть и стебли растений. Значительная часть этих материалов остаётся неиспользованной или утилизируется путём сжигания и захоронения, что считается неэффективным и экологически вредным подходом.

Сжигание сельскохозяйственных отходов наносит серьёзный вред окружающей среде. Оно сопровождается выбросами парниковых газов, ухудшением качества воздуха и утратой органических веществ в почве. Кроме того, это создаёт риски для здоровья людей. С учётом изменения климата и ужесточения экологических норм, такие методы утилизации становятся всё менее допустимыми.

При этом аграрные остатки содержат полезные вещества — целлюлозу, лигнин и гемицеллюлозу. Эти компоненты могут служить сырьём для производства биоматериалов, энергии и химических веществ, если использовать их более рационально.

Переработка аграрных отходов особенно важна для стран с ограниченными лесными ресурсами, таких как Узбекистан. Из-за нехватки древесины развитие собственной бумажной промышленности здесь затруднено. В таких условиях использование местного сырья, например рисовой соломы, становится разумной альтернативой.

Это позволяет уменьшить зависимость от импорта бумаги и целлюлозы, а также развивать экологически ориентированное производство, основанное на местных ресурсах.



Разработка новых технологий переработки сельскохозяйственных отходов — важное направление науки и практики. Такие технологии помогают экономить ресурсы, снижать вред для окружающей среды и повышать эффективность аграрного производства.

Рисовая солома — это один из основных отходов, образующихся при выращивании и уборке риса. На каждую тонну риса приходится от 1 до 1,5 тонн соломы. В мире ежегодно накапливаются десятки миллионов тонн этого сырья, и большая его часть либо не используется, либо утилизируется вредными для окружающей среды способами.

Наиболее распространёнными способами утилизации рисовой соломы остаются её сжигание в полевых условиях и оставление на поверхности почвы без дальнейшей переработки. Оба метода несут серьёзные экологические риски. Сжигание вызывает выбросы углекислого газа, оксидов азота и мелкодисперсных частиц, ухудшающих качество воздуха и способствующих изменению климата. А захоронение соломы без обработки увеличивает объёмы отходов и способствует размножению патогенных микроорганизмов в почве.

В Узбекистане, где рисоводство играет важную роль в сельском хозяйстве, переработка рисовой соломы остаётся нерешённой задачей. При урожайности до 400 тысяч тонн риса в год образуется большое количество соломы. Однако централизованной системы её переработки не существует. В результате большинство хозяйств утилизируют солому путём сжигания, что ухудшает экологическую обстановку в аграрных регионах и увеличивает углеродный след.

Рисовая солома обладает высоким потенциалом как сырьё для переработки. Благодаря содержанию целлюлозы до 40%, её можно использовать для производства бумаги, биокомпозитов и биоэнергетических ресурсов.

Рациональное использование этого материала поможет сократить объёмы отходов и одновременно послужит основой для развития «зелёной» экономики. Это также откроет новые рабочие места и повысит технологическую независимость страны.

Эффективная переработка рисовой соломы — важная и актуальная задача как для Узбекистана, так и для других стран. Для её решения необходимы современные технологии, основанные на принципах экологичности, экономичности и рационального использования ресурсов.

График 1. Сравнение выхода бумажной массы из рисовой соломы и других однолетних растений при использовании предлагаемого метода сульфатного отстаивания



Цель исследования — разработать эффективный и экологически безопасный метод получения бумажной массы из рисовой соломы. Основная задача — создать



альтернативное сырьё для бумажной промышленности и снизить нагрузку на окружающую среду за счёт переработки аграрных отходов.

Таблица 1. Химический состав рисовых стеблей

№	Компонент	Количество, %
1.	α-целлюлозы	38-40
2.	Лигнин	14-16
3.	Гемицеллюлоза	18-22
4.	Зольность	16-18

Анализ таблицы 2 обладающий элемент в составе рисовой соломы является диоксид кремния, что также подтверждено результатами других исследователей.

Таблица 2. Оксидный состав рисовой соломы

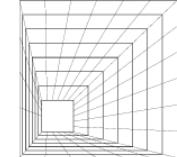
Оксид	Содержание, %
SiO ₂	15,64
CaO	0,61
Al ₂ O ₃	0,24
Fe ₂ O ₃	0,12
MgO	0,45
SO ₃	0,18
Na ₂ O	0,48
K ₂ O	0,28
Потери при прокаливании (ППП)	82,0

Как видно из таблицы, основным неорганическим компонентом золы рисовой соломы является диоксид кремния (SiO₂), содержание которого превышает 15%. Это подтверждает данные других исследователей и подчёркивает необходимость учитывать кремнезём при выборе технологии переработки.

Предложена и оптимизирована технология сульфидного отстаивания рисовой соломы — отхода с высоким содержанием кремнезема, ранее слабо использованного в целлюлозно-бумажной промышленности. Разработан мягкий режим низкотемпературной переработки, позволяющий извлекать целлюлозные волокна при сниженных энергозатратах и с минимальным использованием вредных реагентов.

Полученные результаты могут быть использованы для:

- промышленной переработки рисовой соломы в странах с дефицитом древесины (например, в Узбекистане);
- снижения объёмов сжигаемых аграрных отходов и улучшения экологической обстановки;
- создания импортонезависимых производств бумаги на основе местного сырья;
- повышения эффективности аграрного сектора за счёт повторного использования биомассы.



Сжигание остаётся наиболее распространённым способом утилизации рисовой соломы, особенно в странах с развитым рисоводством. Обычно солому сжигают прямо на полях или в специальных установках для получения тепловой энергии.

Однако этот метод вызывает серьёзные экологические проблемы. При сгорании выделяются углекислый газ (CO_2), оксиды азота (NO_x) и мелкие частицы, загрязняющие воздух и способствующие изменению климата. Кроме того, после сжигания остаётся большое количество золы с высоким содержанием кремнезема, которую также необходимо утилизировать.

Компостирование — более экологичный способ утилизации рисовой соломы. В процессе её биологического разложения образуется органическое удобрение, обогащённое кремнием и органическими веществами. Такой компост улучшает структуру почвы.

Однако рисовая солома плохо поддаётся разложению из-за высокого содержания лигнина и кремнезема в клеточных стенках. Это замедляет компостирование и требует дополнительных мер: использования микроорганизмов-деструкторов или предварительной механической обработки.

Газификация — сравнительно новый способ переработки рисовой соломы. В ходе этого процесса солома превращается в синтез-газ — смесь горючих газов, которая может использоваться для выработки тепла и электроэнергии. Такой подход позволяет уменьшить объёмы отходов и использовать солому как возобновляемый источник энергии.

Однако технология газификации требует сложного оборудования и точного контроля параметров. Также необходима предварительная очистка полученного газа от загрязнений, что увеличивает как капитальные, так и эксплуатационные расходы.

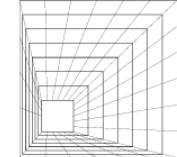
Существует несколько химических методов получения бумажной массы из растительного сырья. Наиболее известны содовый процесс, сульфатный (крафт-процесс) и недавно предложенный метод мягкого сульфатного отстаивания. Каждый из них имеет свои особенности, особенно при переработке недревесных материалов, таких как рисовая солома и шелуха.

Сульфатный (или крафт-) процесс — самый распространённый промышленный метод получения целлюлозы из древесины. Он основан на использовании белого щёлока, в состав которого входят гидроксид натрия (NaOH) и сульфид натрия (Na_2S). Эти вещества эффективно разрушают лигнин, позволяя извлечь прочные целлюлозные волокна с высоким выходом.

Преимуществом метода является возможность регенерации химикатов, что снижает производственные расходы. Однако при переработке недревесного сырья, особенно богатого кремнезёмом (например, рисовой соломы), возникают сложности. Кремнезём загрязняет щёлок и образует трудноудаляемые отложения на оборудовании, что требует дополнительной очистки и увеличивает затраты.

Метод прост по технологии, использует сравнительно нетоксичные реагенты и подходит для переработки различных видов недревесной биомассы. Однако у него есть серьёзные недостатки: низкий выход целлюлозы, высокая температура варки (140–160 °C) и трудности с утилизацией отработанного раствора (так называемого щёлока).

Сульфатный процесс (крафт-процесс) является наиболее распространённой промышленной технологией получения целлюлозы из древесины. При этом процессе используется белый щёлок, содержащий гидроксид натрия (NaOH) и сульфид натрия (Na_2S), что обеспечивает более эффективное разрушение структуры лигнина. Сульфатный процесс позволяет получать целлюлозу с высоким выходом и прочностью волокон, а также предусматривает регенерацию отработанных химикатов, что снижает



производственные издержки. Однако при переработке недревесного сырья, особенно богатого кремнезёмом (как рисовая солома и шелуха), процесс сталкивается с проблемами загрязнения щёлока и образования трудноудаляемых отложений, что требует дополнительной очистки и удорожает производство.

Предлагаемый метод представляет собой перспективную модификацию технологии химической делигнификации, адаптированную для переработки недревесных материалов. В отличие от традиционной варки, процесс проводится при пониженных температурах (20–60 °C) и без применения высоких давлений, что значительно снижает энергозатраты. Использование сульфатного компонента в щелочном растворе способствует эффективному разрушению связей лигнина при щадящих условиях обработки. Сульфидное отстаивание позволяет минимизировать выбросы вредных веществ, упростить утилизацию растворов и сократить время подготовки сырья к дальнейшему использованию. Основными ограничениями метода являются длительность процесса (до 24 часов) и сравнительно невысокий выход целлюлозы по сравнению с сульфатным процессом.

Одной из ключевых особенностей рисовой соломы, значительно отличающей её от других видов растительного сырья, является высокое содержание кремнезема (SiO_2), составляющее от 15% до 20% массы сухого вещества. Эта характеристика обуславливает целый ряд технологических и экологических проблем при переработке шелухи для получения целлюлозы и других продуктов.

- Во-первых, наличие большого количества кремнезема затрудняет химическую переработку соломы. В процессе традиционной варки (содовой или сульфатной) кремнезём переходит в щёлочной раствор, что приводит к его насыщению кремнекислотой и образованию трудноудаляемых отложений на поверхности теплообменных аппаратов, трубопроводов и реакторов. Это увеличивает частоту проведения технологических остановок для очистки оборудования, снижает теплообменную эффективность и увеличивает эксплуатационные расходы.

- Во-вторых, высокая минерализация отработанных растворов осложняет их регенерацию и повторное использование. Накопление кремнезема в щёлоче снижает эффективность восстановления химикатов, что увеличивает потребление свежих реагентов и негативно сказывается на экономике производства.

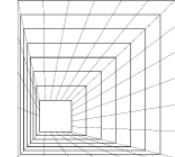
- В-третьих, наличие кремнезема влияет на свойства бумажной массы. Его остатки в массе ухудшают оптические и механические характеристики бумаги, снижая её белизну, прочность и однородность. Дополнительные стадии очистки для удаления кремнезема увеличивают сложность и стоимость технологического процесса.

Кроме того, при сжигании рисовой соломы в золе концентрируется кремнезём, что делает её трудно используемой в стандартных процессах утилизации или повторного применения.

Рисовая солома, так же, как и шелуха, характеризуется высоким содержанием кремнезема (SiO_2), что создаёт серьёзные технологические трудности при её переработке для получения целлюлозы и других материалов. Высокая минеральная составляющая осложняет процесс химической делигнификации, снижает качество бумажной массы и приводит к образованию трудноудаляемых отложений на оборудовании.

В связи с этим разработаны различные подходы для решения проблемы кремнезема в технологических схемах переработки рисовой соломы.

- 1. Механическая и химическая предварительная очистка. Перед основным этапом переработки солома может подвергаться промывке или обработке слабокислыми растворами (например, раствором уксусной кислоты), что



позволяет частично удалить свободный кремнезем и растворимые минеральные примеси. Однако такие методы увеличивают водопотребление и могут повысить общую стоимость технологии.

- 2. Применение щадящих условий химической обработки.

Для минимизации растворения кремнезема в щёлочные растворы перспективным является использование мягких условий переработки — пониженных температур (20–60 °C) и невысоких концентраций щёлока. Такие условия позволяют сохранять кремнезем преимущественно в твёрдой фазе и предотвращают его переход в жидкую фазу, тем самым уменьшая загрязнение отработанных растворов.

- 3. Использование сульфидных компонентов в составе реагентов.

Введение сульфидов натрия в рабочие растворы способствует более эффективному разрушению связей лигнина без активной мобилизации кремнезема. Сульфатное отстаивание рисовой соломы позволяет повысить выход целлюлозы при снижении загрязнения оборудования и уменьшении образования кремниевых осадков.

- 4. Рациональная утилизация побочных продуктов.

Кремнезём, выделенный на разных стадиях переработки рисовой соломы, может быть использован как ценное сырьё для производства строительных материалов, адсорбентов или удобрений, что повышает общую экономическую эффективность процесса и минимизирует образование отходов.

Таким образом, для эффективной переработки рисовой соломы с высоким содержанием кремнезема требуется комплексный подход, сочетающий оптимизацию технологических параметров, модификацию состава реагентов и развитие замкнутых циклов утилизации побочных продуктов. В этом контексте технология сульфидного отстаивания представляет собой одну из наиболее перспективных альтернатив традиционным методам переработки.

Таблица 3. Выход волокнистого материала относительно начального количества рисовой соломы в смеси натриевых солей со щелочью

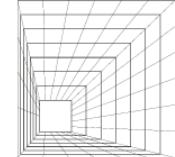
Соли в растворе, %	Продолжительность отстаивания, час				
	24	48	72	86	120
25	93,0%	88,4%	84,0%	81,4%	80,2%
20	93,0%	91,1%	86,6%	82,3%	80,6%
15	94,1%	92,2%	88,5%	85,9%	84,2%
10	95,8%	93,9%	90,1%	86,5%	84,8%
5	97,1%	95,2%	92,3%	88,6%	86,8%

Данный метод облагораживания показал приемлемый результат как качественном, так и в количественном отношении

Эффективность замачивания в растворе химических реагентов также подтверждает и показатели зольности полученных продуктов(табл.4).

Таблица 4. Выход материала после двухэтапного замачивания в растворе химических реагентов

Соли в растворе относительно соломы, %	Продолжительность отстаивания, час				
	24	48	72	86	120
25	82,1%	77,4%	72,7%	67,2%	66,2%



20	84,9%	81,5%	75,0%	67,9%	66,5%
15	87,4%	83,0%	75,6%	68,0%	66,6%
10	90,8%	87,2%	81,9%	74,6%	73,1%
5	93,1%	89,4%	84,0%	77,3%	75,7%

Таблица 5. Зольность продукта относительно начального количества рисовой соломы при замачивании в растворе химических реагентов

Соли в растворе относительно соломы, %	Продолжительность отстаивания, час				
	24	48	72	86	120
25	8,12%	7,52%	6,91%	6,66%	6,41%
20	8,34%	7,83%	7,32%	6,86%	6,43%
15	8,56%	8,14%	7,72%	7,07%	6,41%
10	8,77%	8,43%	8,08%	7,50%	6,92%
5	8,98%	8,71%	8,44%	7,94%	7,43%

Из анализа данных таблиц следует, что раздельное замачивание эффективнее разового, а выходной продукт больше похож на термомеханическую массу. Кроме того, согласно полученным данным, на пятые сутки количество вымываемых веществ понижается и длительное отстаивание является неэффективным, равно как и использование более концентрированных растворов.

Этап оптимизации по облагораживанию рисовой соломы методом замачивания подразумевал получение количества волокнистого продукта(Y_1 , %), а также зольность(Y_2 , %), в качестве переменных факторов были приняты: X_1 –концентрация реагентов $\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SO}_4 : \text{Na}_2\text{CO}_3$ (2:1:1) в реакционном растворе, % от массы а.с.с; X_2 – длительность замачивания(учитывая замачивание в последние сутки в чистой горячей воде), час. Другие параметры: гидромодуль 4, температура делигнификации 25 °C.

Таблица 6. Матрица планирования эксперимента по замачиванию рисовой соломы в смеси химических реагентов и результаты реализации

№ экспери- мента	Количество реагентов, % (X_1)	Продолжительность процесса, час (X_2)	Выход волокнистого продукта, % (Y_1)
1.	5	24	93,1
2.	5	72	84,0
3.	5	120	75,7
4.	15	24	87,4
5.	15	72	75,6
6.	15	120	66,6
7.	25	24	82,1
8.	25	72	72,7
9.	25	120	66,2

Результат графической интерпретации представлен на рис. 1.

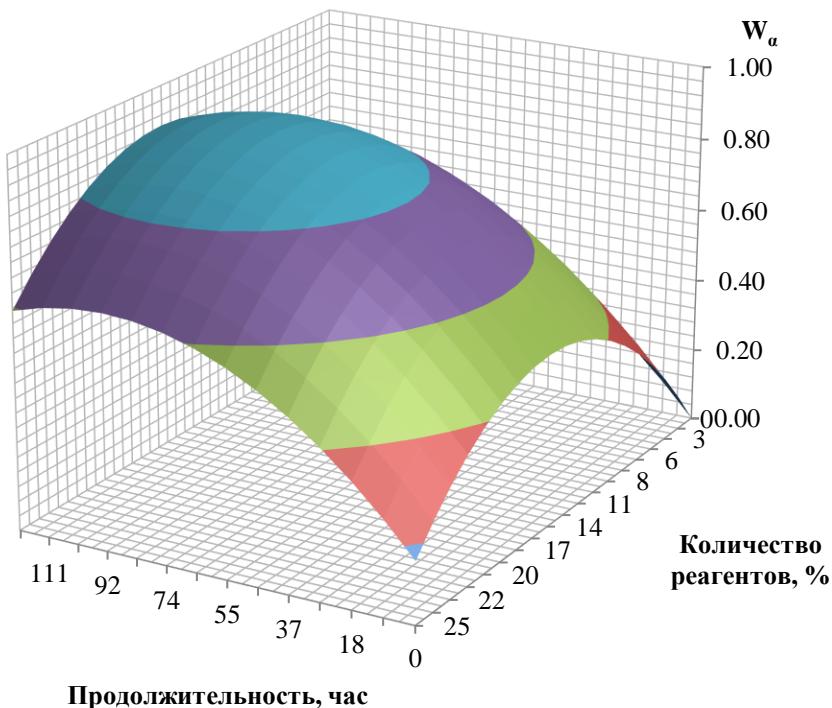
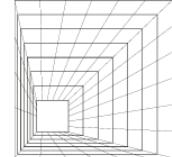


Рисунок 1. Результат оптимального параметра W_a путем замачивания в растворе реагентов

При использовании оптимальных режимов делигнификации получен качественный волокнистый продукт с выходом 66,8 %, который имеет 6,54 % зольности, что подтверждает, что расчетные данные находятся в хорошем соответствии с экспериментальными.

В дальнейших испытаниях было решено использовать волокнистый материал, получаемый при раздельном 92 часовом замачивании в растворе химических реагентов в 14% количестве относительно массе рисовой соломы. Для минимизации расходов при первичном отстаивании было решено использовать горячую воду, оставшуюся после вымывания конечного продукта.

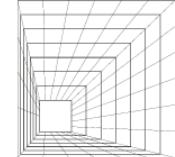
Среди различных методов переработки рисовой соломы для получения целлюлозной массы технология сульфатного отстаивания выделяется рядом существенных преимуществ, делающих её особенно перспективной в условиях необходимости повышения экологичности и экономической эффективности производств.

1. Низкие энергозатраты. Процесс сульфатного отстаивания проводится при относительно низких температурах (20–60 °C) без применения высокого давления, что позволяет существенно сократить потребление энергии по сравнению с традиционными варочными процессами (содовый и сульфатный), требующими температур 140–170 °C.

2. Минимизация растворения кремнезема.

Щадящие условия обработки способствуют сохранению кремнезема в твёрдой фазе, предотвращая его переход в отработанные щёлочные растворы. Это снижает риск образования трудноудаляемых отложений на оборудовании и упрощает процесс утилизации или последующего использования побочных продуктов.

3. Повышение экологичности процесса. Отсутствие необходимости в агрессивных химикатах и снижение выбросов токсичных газов (таких как сероводород



в традиционном сульфатном процессе) делает сульфидное отстаивание более безопасным для окружающей среды и здоровья работников производства.

4. Высокая сохранность структуры волокон. Благодаря мягким условиям обработки полученная бумажная масса характеризуется высокой степенью полимеризации и улучшенными физико-механическими свойствами, что делает её пригодной для производства широкого спектра бумажной продукции, включая упаковочные материалы, санитарно-гигиенические изделия и техническую бумагу.

5. Гибкость технологических параметров. Процесс сульфатного отстаивания допускает широкую вариабельность времени обработки, концентраций реагентов и гидромодуля, что позволяет адаптировать его под различные типы сельскохозяйственного сырья и требования к качеству конечного продукта.

6. Возможность интеграции в существующие производственные схемы. Технология сульфатного отстаивания может быть внедрена как на новых предприятиях, так и на модернизированных мощностях существующих целлюлозно-бумажных заводов без необходимости радикальных изменений инфраструктуры, что снижает капитальные вложения.

Таким образом, применение технологии сульфатного отстаивания для переработки рисовой соломы открывает новые возможности для создания энергоэффективных, экологически безопасных и экономически жизнеспособных производств бумаги, особенно в регионах с ограниченными лесными ресурсами, таких как Узбекистан. В качестве исходного сырья для проведения исследований использовалась рисовая солома, собранная на рисовых полях Ферганской долины (Республика Узбекистан) после сезона уборки 2024 года. Солома была предварительно очищена от посторонних включений (земли, песка, камней) и высушена на воздухе до постоянной массы.

Основными химическими реагентами, применяемыми в процессе переработки, являлись:

- гидроксид натрия (NaOH , чистота 98%, лабораторного класса),
- сульфат натрия (NaSO_4 , чистота 96%),

Дистиллированная вода использовалась для всех стадий промывки и разбавления реагентов.

Перед началом опытов рисовая солома была измельчена до размеров частиц 1–5 мм с использованием лабораторной мельницы. Для удаления растворимых примесей солома дополнитель но промывалась тёплой дистиллированной водой и высушивалась при температуре 50 °C.

Процесс сульфатного отстаивания осуществлялся в лабораторной коррозионно-стойкой ёмкости объёмом 5 л.

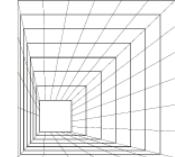
Параметры процесса варьировались следующим образом:

- концентрация гидроксида натрия в пересчёте на Na_2O : 15–20%;
- концентрация сульфатной составляющей (сульфатность): 20–30%;
- гидромодуль (отношение массы раствора к массе сухого сырья): 4:1 или 5:1;
- температура отстаивания: 20, 40 и 60 °C;
- продолжительность процесса: 12, 18 и 24 часа.

После окончания отстаивания масса тщательно промывалась дистиллированной водой до нейтрального pH фильтрата.

Таблица 7. Маркировка и характеристики образцов

Характеристика	Обозначение образца
----------------	---------------------



	CP ₁	CP ₂	CP ₃
Метод получения	Натуральный	Замачивание	Варочный
Описание внешнего вида	Зеленые и желтые стебли	Полупрозрачные бежевые волокна	Тонкие светло-серые волокна
Выход, %	-	66,8	54,2
Зольность, %	12,6	6,54	4,11

При определении зольности образцов было установлено, что больше всего этот показатель понизился у образца CP₃(с 12,6% до 4,11%). У образца CP₂, полученного методом замачивания в смеси реагентов, зольность чуть больше чем у варочной массы – 6,54%.

Понижение зольности объясняется тем что минеральные компоненты в результате химической обработки перешли в растворную часть. Таким образом, в процессе делигнификации рисовых стеблей зольность отделяемых целлюлозных масс снижается, что повышает качественные характеристики волокнистого материала.

Сравнительный анализ представленный на рисунке 3.4 инфракрасных спектров показал различие в содержании Si, C, O элементов. Это, связано с различиями в способах делигнификации рисовой соломы, использованных при получении волокнистой пульпы.

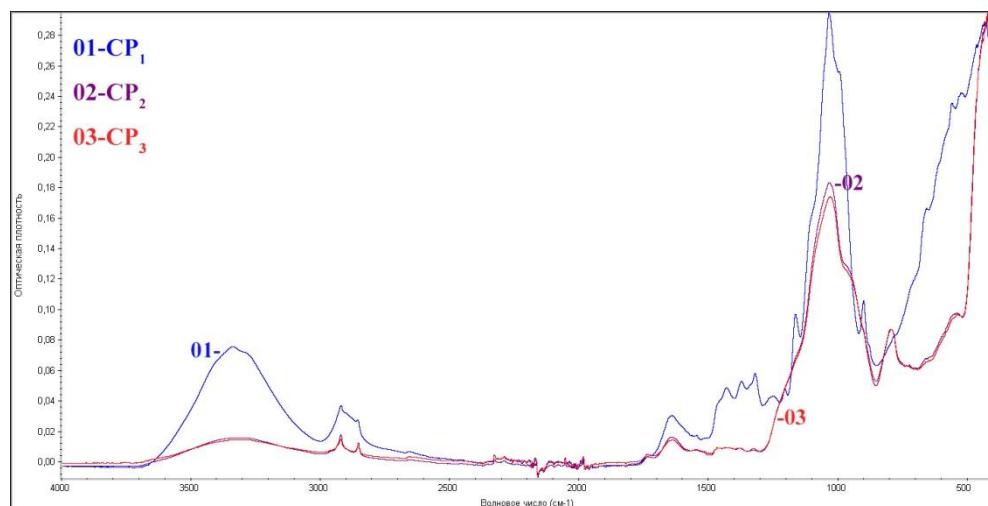
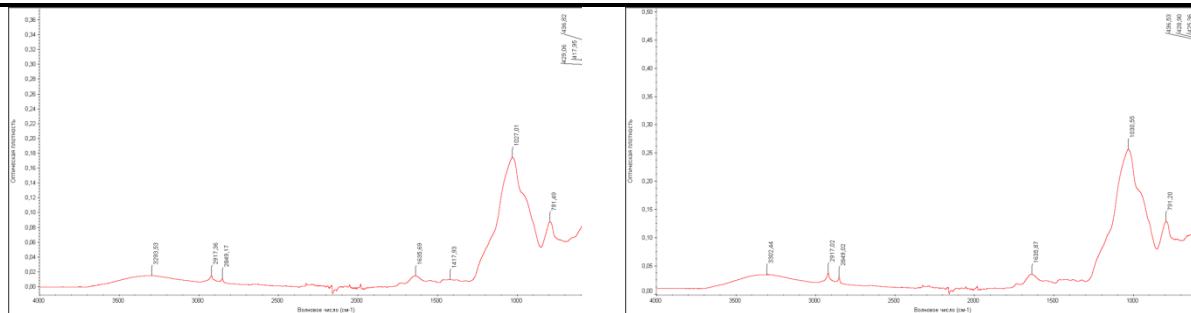
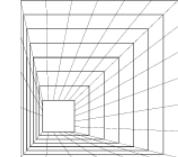
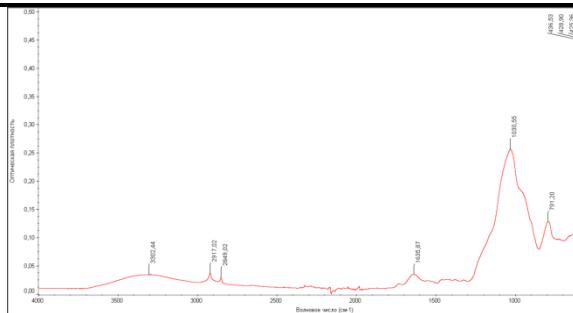


Рисунок 2. Сравнительный график ИК-спектров образцов натуральной и переработанных разными методами воздействия рисовой соломы

Сравнительный анализ ИК-спектров рисовой соломы исследуемых образцов и ИК спектре волокон показал присутствие целлюлозы. На графиках это отображается в виде областей: 3000–2800 cm^{-1} , 3700–3100 cm^{-1} , 1500–900 cm^{-1} , 1680–1630 cm^{-1} , 900–700 cm^{-1} , в которых происходит колебание гидроксильных групп и связей, а также адсорбирование молекул воды при различных колебаниях связей CH и пиранозы.

Результаты спектрального анализа показали возможность получения более чистой волокнистой массы, поскольку в исследуемых спектрах не обнаружены ароматические структуры и уроновые кислоты. Также на спектрах отмечены пики со значениями 1504 и 1510 cm^{-1} , которые характерны бензольному кольцу, который соответствует лигнину, однако данное количество не ухудшает качественные показатели конечного продукта.


Рисунок 3. Инфракрасный спектр СР3

Рисунок 4. Инфракрасный спектр СР2

Анализ полученных спектральных зависимостей представленных на рисунках 3.5-3.5 свидетельствует о высоком содержании целлюлозы и отсутствием неорганических соединений.

Эти результаты объясняются ускорением процессов разрушения лигнингемицеллюлозного комплекса при более высоких температурах. Однако следует отметить, что чрезмерное увеличение времени отстаивания без пропорционального повышения температуры приводит к замедлению прироста выхода бумаги, что указывает на достижение стадии насыщения реакции.

Внедрение технологии сульфатного отстаивания для переработки рисовой соломы обладает существенными экологическими преимуществами по сравнению с традиционными методами утилизации аграрных отходов:

- Снижение выбросов парниковых газов. Вместо сжигания соломы, сопровождающегося выбросами углекислого газа (CO_2), оксидов азота (NO_x) и мелкодисперсных частиц, переработка отходов в целлюлозу позволяет избежать прямых эмиссий загрязняющих веществ в атмосферу.

- Снижение загрязнения почв и воды. Отказ от компостирования без должной обработки снижает риски загрязнения почв тяжёлыми металлами и органическими остатками, содержащимися в неразложившейся биомассе.

- Рациональное использование возобновляемых ресурсов. Переработка рисовой соломы способствует реализации принципов замкнутой экономики и позволяет использовать аграрные отходы в качестве ценного сырья для промышленности.

- Минимизация образования вредных побочных продуктов. Применение мягких условий обработки и перекиси водорода снижает потребность в агрессивных химикатах и упрощает утилизацию отработанных растворов, снижая общую токсичность производственного цикла.

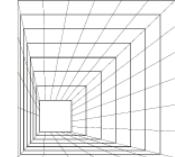
Предварительная оценка экономической эффективности технологии сульфидного отстаивания показывает её конкурентоспособность в сравнении с традиционными методами:

- **Снижение энергозатрат.** Процесс проходит при температуре 20–60 °C, что позволяет экономить до 30–40% энергетических ресурсов по сравнению с традиционными варочными процессами.

- **Сокращение затрат на оборудование.** Отсутствие необходимости работать под давлением позволяет использовать менее капиталоёмкое и коррозионно-устойчивое оборудование.

- **Использование дешёвого и доступного сырья.**

Рисовая солома является побочным продуктом рисоводства и практически не имеет стоимости на первичном рынке, что позволяет значительно сократить затраты на сырьё.



• **Потенциальная возможность создания побочных продуктов.**

Кремнезём, выделенный на стадии переработки, может быть использован для производства строительных материалов, адсорбентов или удобрений, что дополнительно повышает общую рентабельность процесса.

В расчётах было установлено, что себестоимость получения 1 тонны целлюлозы из рисовой соломы методом сульфидного отстаивания может быть на 20–25% ниже, чем при использовании традиционной сульфатной технологии (без учёта транспортных и инфраструктурных расходов).

Таким образом, технология переработки рисовой соломы методом сульфатного отстаивания обладает высокой экологической устойчивостью и экономической целесообразностью, что делает её привлекательной для практического внедрения в условиях стран с развивающимся аграрным сектором и ограниченными лесными ресурсами, таких как Узбекистан.

В результате проведённого исследования установлено следующее:

1. Рисовая солома, являющаяся побочным продуктом аграрного производства, обладает высоким содержанием целлюлозы (до 40%) и представляет собой перспективное сырьё для бумажной промышленности, особенно в странах с ограниченными лесными ресурсами.

2. Высокое содержание кремнезема в рисовой соломе создает технологические сложности при её переработке традиционными методами, однако использование технологии сульфидного отстаивания позволяет минимизировать переход кремнезема в щелочные растворы и улучшить качество получаемой целлюлозы.

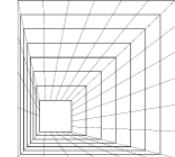
3. Проведённые эксперименты показали, что оптимизация температурного режима и продолжительности процесса сульфидного отстаивания позволяет увеличить выход целлюлозы до 35%, сохраняя при этом высокие физико-механические свойства волокон.

4. Экологический и экономический анализ показал, что переработка рисовой соломы методом сульфидного отстаивания способствует снижению энергозатрат, уменьшению выбросов парниковых газов и повышению рентабельности производства целлюлозы.

Таким образом, технология сульфатного отстаивания рисовой соломы представляет собой эффективный, экологически безопасный и экономически целесообразный способ получения бумаги, обладающей высоким качеством. Разработка и внедрение данной технологии в промышленную практику может значительно сократить зависимость от импорта бумажной продукции, а также способствовать решению экологических проблем, связанных с утилизацией сельскохозяйственных отходов в Узбекистане и других странах.

Использованная литература

- Гусев Б. В. Химическая технология целлюлозы и бумаги. — М.: Химия, 2002. — 528 с.
- Бураков А. А., Гусев С. И. Переработка отходов сельского хозяйства. — М.: КолосС, 2017. — 336 с.
- Захаров А. И., Кузнецова И. М. Целлюлозные материалы: получение, свойства, применение. — СПб.: Политехника, 2015. — 312 с.
- Юсупов А. Р., Холматов Ж. А. Технологии получения целлюлозы из нетрадиционного сырья. // Химическая промышленность сегодня. — 2021. — №6. — С. 45–50.
- Бобокалонов Ш. Ш. Агроэкологические проблемы и пути их решения в условиях Узбекистана. — Ташкент: Фан, 2020. — 196 с.



6. Абдукаримов А. Т., Муминов Н. М. Разработка экологически чистых технологий переработки сельхозотходов. // Вестник ТФТИ. — 2022. — №4. — С. 23–30.
7. FAO. Rice Straw Management: Best Practices. — Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019. — 68 p.
8. Reddy N., Yang Y. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. // Trends in Biotechnology. — 2005. — Vol. 23, No. 1. — P. 22–27.
9. Binod P., Sindhu R., et al. Bioethanol production from agricultural waste biomass: An overview. // Renewable Energy. — 2010. — Vol. 34, No. 1. — P. 13–20.
10. Sharma B., Larroche C., Dussap C. G. Comprehensive assessment of 2nd generation bioethanol production from rice straw. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2020. — Vol. 78. — P. 608–620.