

эфира.

Следует отметить, что предложенная методика не относится к разряду экспрессных при проведении термостатирования образцов при температуре 90 °С, однако, она является безопасной и дает полноценное представление о химической стойкости опытных образцов в соответствии с критерием стоящей на вооружении в отрасли методики [8], но с использованием современной аналитической базы.

ВЫВОДЫ

Разработан безопасный метод оценки химической стойкости НЦ с применением хроматографического анализа газообразных продуктов распада. Данный метод апробирован на образцах НЦ из хлопка и альтернативных видов целлюлозы (мискантуса и плодовых оболочек овса), показана перспективность его использования для исследования характеристик поисковых НЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жегров Е.Ф., Милехин Ю.М., Берковская Е.В. Химия и технология баллистических порохов, твердых ракетных и специальных топлив: в 2-х т. – Технология: монография. – М.: РИЦ МГУП им. И. Федорова, 2011. – Т.1. – С. 95-103.
2. Питеркин Р.Н., Просвирнин Р.Ш., Петров Е.А. Технология нитроэфиров и нитросодержащих промышленных взрывчатых веществ. – Монография. – Бийск: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2012. – С. 252-256.
3. Торгун, И.Н. Лен в пороховой промышленности / И.Н. Торгун [и др.]. – М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2012. – 248 с.
4. Будаева В.В., Митрофанов Р.Ю., Золотухин В.Н., Сакович Г.В. Новые сырьевые источники целлюлозы для технической химии // Вестник Казанского технологического университета. – Казань: Издательство КГТУ. – 2011. – № 7. – С. 205-212.
5. Якушева А.А., Будаева В.В., Бычин Н.В., Сакович Г.В. Получение и стабилизация нитратов целлюлозы из плодовых оболочек овса // Ползуновский

вестник. – 2013. – № 1. – С. 211-215.

6. Якушева А.А., Золотухин В.Н., Будаева В.В., Митрофанов Р.Ю. Нитраты целлюлозы из российского мискантуса и отходов злаков / Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы V Всерос. конф., Барнаул, 24-26 апреля 2012 г. // Под ред. Н.Г. Базарновой, В.И. Маркина. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2012. – С. 46-48.

7. Якушева А.А. Стабилизация нитратов целлюлозы из мискантуса и плодовых оболочек овса / Молодежь и наука на Севере: материалы III Всероссийской молодежной научной конференции, 22-26 апреля 2013 г., г. Сыктывкар: в 2-х т. / Коми научный центр УрО РАН. – Сыктывкар: Редакционно-издательский отдел Коми научного центра УрО РАН, 2013. – Т. 2. – С. 69-70.

8. ГОСТ В 10836. Нитроцеллюлоза. Метод определения химической стойкости. Издание официальное. – М.: Издательство стандартов, 1975. – С. 44-49.

Вдовина Наталья Павловна, руководитель группы, кандидат технических наук ОАО «ФНПЦ «Алтай», vdovina-n-p@mail.ru, ул. Социалистическая, 16, Бийск, 659322, Россия. Тел.: (3854) 301393, 301050; факс: (3854) 311309, 253403.

Будаева Вера Владимировна, заведующая лабораторией биоконверсии, кандидат химических наук, доцент Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), budaeva@ircet.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-59-85, факс (3854) 30-17-25.

Якушева Анна Александровна, младший научный сотрудник лаборатории биоконверсии, аспирант Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Yakusheva89_21.ru@mail.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-59-85, факс (3854) 30-17-25.

УДК 661.728.7:577.152.3

ВЛИЯНИЕ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТАТИВНОГО ГИДРОЛИЗА ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ

Т.П. Щербакова¹, Е.В. Удортина¹, Е.И. Макарова², В.В. Будаева²

Исследовано влияние механохимических и химических воздействий на физико-химические характеристики и функциональный состав лигноцеллюлозы соломы ржи. Проведено тестирование полученных лигноцеллюлоз в качестве субстратов для гидролиза комплексным фер-

ментным препаратом. Установлена зависимость реакционной способности субстратов к ферментации от способа их получения.

Ключевые слова: лигноцеллюлозные материалы, солома ржи, механохимические обработки, ферментативный гидролиз, редуцирующие вещества.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка эффективных технологий преобразования растительного сырья для процесса получения биотоплива второго поколения стала приоритетным вопросом для общества в силу увеличивающейся потребности в топливе, создавших экологических проблем и сокращения энергетически полезных ископаемых. Перспективным направлением исследований в этой области по-прежнему является изучение ферментативного гидролиза для преобразования лигноцеллюлозной биомассы.

Для успешного процесса ферментативного гидролиза растительных полимеров любого биологического происхождения необходимо: использование эффективных для субстрата ферментных препаратов, предварительная подготовка растительного сырья (подготовка субстрата), разработка оптимальных параметров процесса ферментации [1-3].

Необходимым условием гидролитической реакции является непосредственный контакт (физический) между ферментом и субстратом. Такой контакт «фермент-субстрат» может быть достигнут только диффузией молекул фермента к доступным участкам поверхности целлюлозы.

При этом кроме необходимого соответствия размеров и диффузионной способности ферментов с капиллярной структурой целлюлозы, важное значение имеют кристалличность и содержание сопутствующих компонентов в исследуемой целлюлозе. Известно, что эффективность ферментативного гидролиза возрастает с уменьшением степени кристалличности (СК) и со снижением содержания сопутствующих компонентов (лигнина) [4].

Устойчивость к действию ферментов высоко кристаллической целлюлозы по сравнению с аморфизированной определяется так же конформационной и стерической жесткостью глюкопиранозных звеньев в кристаллических областях целлюлозы.

Таким образом, предварительная подготовка лигноцеллюлозных материалов, обеспечивающая эффективный ферментативный гидролиз целлюлозы, должна гарантировать уменьшение СК целлюлозы и повышение глубины ее делигнификации. Также имеет значение общая поверхность целлюлозного суб-

страта.

Известные методы предварительной подготовки растительных субстратов для ферментативного гидролиза разделяются на химические и физические. Химические методы – методы делигнификации (кислотные и щелочные). При щелочном (сульфатном) методе делигнификации удаление лигнина сопровождается значительными потерями легкогидролизуемой части целлюлозы. При кислотном (сульфитном) методе разрушение лигнина происходит под действием свободной SO₂ и без потерь целлюлозы. Физические методы предварительной обработки растительных композиционных полимеров ограничиваются в основном измельчением их в мельницах различного типа. В результате механического измельчения происходит уменьшение размера частиц, увеличение площади поверхности и значительное уменьшение СК материалов [5, 6, 7].

Данная работа направлена на поиск новых подходов к процессам физико-химической подготовки субстратов на основе лигноцеллюлозы травянистого происхождения для ферментативного гидролиза.

Для этого решался комплекс задач, заключающийся в исследовании влияния активирующих растительное сырье обработок – механохимических и химических воздействий – на физико-химические характеристики и функциональный состав полученных продуктов, а также в установлении закономерностей ферментативной деструкции лигноцеллюлозных материалов от вида и способа их получения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования являлись стебли ржи, отобранные в конце вегетативного периода (Республика Коми, г. Сыктывкар) с содержанием следующих компонентов: лигнина (23,0±2,0) %, целлюлозы (35,0±2,5) %, минеральных веществ (3,8±0,2) %, экстрагируемых веществ (2,8±0,2) %, пентозанов – (31,0±1,2) %.

Предварительная подготовка растительного материала проведена согласно структурной схеме, представленной на рисунке 1.

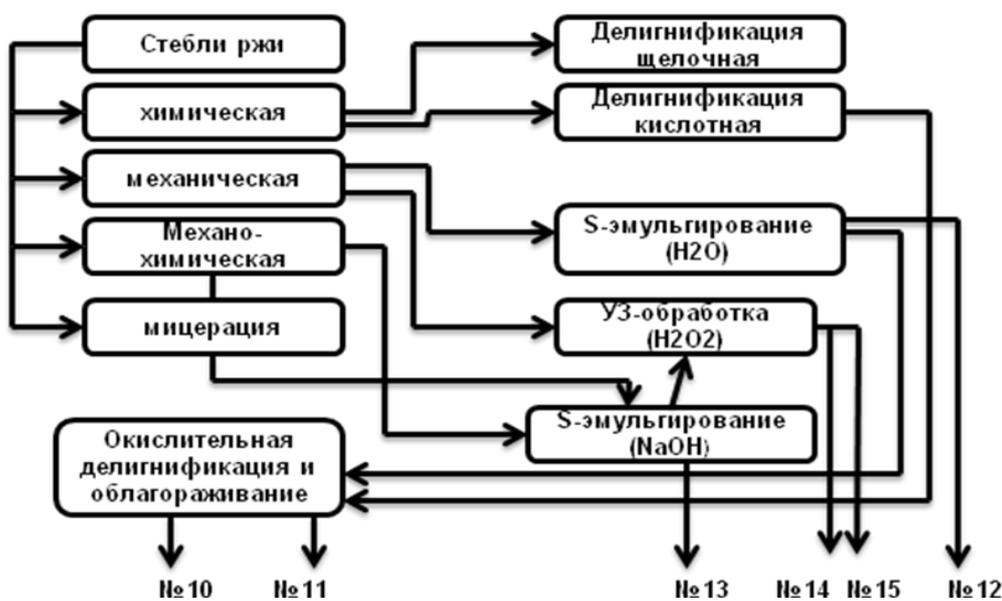


Рисунок 1 – Схема подготовки растительного материала

Делигнификация (щелочная, сульфитная) растительного материала проводилась в лабораторном автоклаве периодического действия в два этапа, заключающихся в пропитке сырья и собственно делигнификации. Основные технологические параметры: равномерное поднятие температуры до 120-125 °С и давления 1,20-1,25 МПа в течение 30-40 мин, общая продолжительность процесса – 90 мин.

S-эмульгирование проводили на установке РПА (роторно-пульсационный аппарат) «S-эмульгатор», с адаптацией технологии получения механической массы из щепы (термомеханической и химикотермомеханической) к соломенному сырью. Высушенные стебли предварительно измельчали (частицы размером 2-4 мм). В емкость «S-эмульгатора» объемом 6 л заливали 3 л реагента (H₂O или раствор NaOH) и при скорости вращения рото-

ра 100 мин⁻¹ загружали 100 г подготовленного образца сырья. Эмульгирование проводили в интервале 15-60 мин при температуре 80 °С.

Ультразвуковую обработку (УЗ) проводили на установке Ultraconic Cenerator IL 10 при частоте звука (22±0,5) кГц, выходной мощности 750 Вт, температуре от 45 °С до 65 °С в течение 5-60 мин.

Мацерацию (набухание) сырья проводили в течение 6-8 ч в водной среде.

Полученные образцы подвергались облагораживанию (окислительной делигнификации) пероксидом водорода (H₂O₂) с расходом 2,5 % от абсолютно сухой навески образца в слабощелочной среде по методике, описанной в работе [8].

В результате определенной комбинаторной подготовки получены образцы, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Спецификация образцов

Обозначение	Схема подготовки
10	Сульфитная делигнификация (Na ₂ SO ₃) – окислительная делигнификация (H ₂ O ₂)
11	S-эмульгирование (H ₂ O) – отбелка (H ₂ O ₂)
12	S-эмульгирование (H ₂ O) – Лиофильная сушка
13	S-эмульгирование (NaOH) – Лиофильная сушка
14	S-эмульгирование (H ₂ O) – окислительная делигнификация (H ₂ O ₂) с УЗ
15	Мацерация – S-эмульгирование (NaOH) – окислительная делигнификация (H ₂ O ₂) с УЗ

Ферментный гидролиз проводили с использованием ферментных препаратов (ФП) «Брюзайм» и «Целлолюкс-А» по методике [3]. В фильтрате определяли концентрацию реду-

цирующих веществ (РВ) в пересчете на глюкозу спектрофотометрически и концентрацию пентоз железорсиновым способом. Выход РВ рассчитан с учетом коэффициента 0,9, свя-

занного с присоединением молекулы воды к ангидроглюкозным остаткам соответствующих мономерных звеньев в результате ферментативного гидролиза.

Изучение структуры образцов проводили методом рентгенофазового анализа (РФА) на рентгенодифрактометре XRD-600 «Shimadzu» (начальный угол 5,00 град., конечный угол 40,00 град., шаг измерения 0,05 град.). Дифракционная интенсивность измерялась в интервале углов дифракции 2θ от 5° до 40° с шагом 5° , расчёт СК осуществляли по методу Сегала [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Так как эффективность ферментативного гидролиза лигноцеллюлоз напрямую зависит от содержания сопутствующих компонентов в сырье и СК целлюлозы, то основными критериями в подготовке образцов являлись: степень делигнификации и СК лигноцеллюлозных материалов. Характеристики образцов на основе соломы ржи, подготовленных различными комбинациями обработок, представлены в таблице 2.

Показано, что в результате высокотемпературной делигнификации (образец 10) происходит снижение содержания лигнина на 80 % по сравнению с исходным значением, содержание лигнина в образце достигает 4,1 %. Содержание а-целлюлозы при этом составляет 79 %, что на 40 % выше, чем в исходном сырье.

Процесс S-эмульгирования соломы в водной среде (образец 12 и 14) характеризуется высокими выходами – 95 % и 85 % соответственно и практически полным сохранением природного компонентного состава (содер-

жание лигнина в образце снижается лишь на 3,6 % и составляет 19,4 %).

Процесс S-эмульгирования соломы в 1 %-ном растворе гидроксида натрия (образцы 13 и 15) характеризуется снижением выхода образца до 70 % и понижением содержания лигнина до 6,8 %, содержание а-целлюлозы в образце составляет – 86 %.

Последующая окислительная делигнификация исследуемых образцов (образцы 10, 11, 14, 15) пероксидом водорода в режиме образования гидропероксид-ионов (НОО-) [8] позволяет повысить степень очистки образцов, содержание лигнина в них составляет $0,8 \pm 3,0$ %. Использование УЗ-интенсификации на стадии окислительной делигнификации образцов (14 и 15) пероксидом водорода в большей степени сказывается на значении содержания лигнина в образце, полученном S-эмульгированием в водной среде (образец 14), снижая его на 88 %. Дополнительная УЗ-обработка образца 15 сопровождается незначительным изменением содержания лигнина и целлюлозы.

Образцы, полученные высокотемпературной делигнификацией и механическим S-эмульгированием в водной среде, незначительно отличаются (~ 6%) по значению средней степени полимеризации, вычисленному по вязкости растворов образцов в кадоксене, $СП_{cp} = 760$ и 810 . Применение УЗ-интенсификации в водной среде и растворе гидроксида натрия при сочетании с окислительной делигнификацией пероксидом водорода способствует снижению $СП_{cp}$ на 28,4 % и 35,8 % соответственно (от максимального вышеуказанного значения).

Таблица 2 – Характеристика образцов, подготовленных для ферментативного гидролиза

Образец	I степень обработки		II степень обработки		Выход, %	СП _{ср.}
	Содержание лигнина, %	Содержание а-целлюлозы, %	Содержание лигнина, %	Содержание а-целлюлозы, %		
00	–	–	23,0	46,0	100,0	–
10	4,1	79,0	0,8	78,5	46,4	810
11	19,4	75,0	3,0	–	87,4	760
12	19,4	75,0	–	–	95,0	800
13	6,8	86,0	–	–	70,0	680
14	19,4	75,0	2,4	74,0	85,5	580
15	6,8	86,0	3,2	78,0	63,0	520

Для оценки изменений, происходящих в структуре лигноцеллюлозных образцов при воздействии химической и механоакустической обработок, использовали метод РФА, позволяющий определить изменение соотношения кристаллических и аморфных

участков в образцах при обработках. На дифрактограммах образцов лигноцеллюлоз (рисунк 2) наблюдаются основные рефлекссы с максимумами в области углов дифракции 2θ $15,5^\circ$ - $16,0^\circ$, $22,3^\circ$ - $22,5^\circ$ и 34° - 35° , характерные для структурной модификации целлюлозы I.

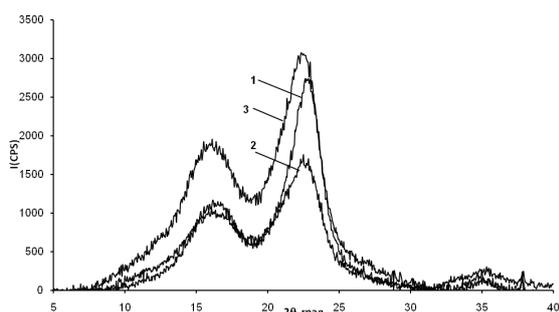


Рисунок 2. – Дифрактограммы лигноцеллюлозных материалов, выделенных из соломы ржи различными способами:
1 – образец 10; 2 – образец 11;
3 – образец 15.

Значения СК, рассчитанные по отношению интенсивностей рефлексов при углах дифракции 2θ в областях $22,3^\circ$ – $22,8^\circ$ и $18,5^\circ$ – $18,9^\circ$, характеризующих кристаллические и аморфные составляющие целлюлозной макромолекулы, представлены в таблице 3.

Учитывая, что СК экстрагированной соломы составляет 75 % [10], сульфитная высокотемпературная делигнификация с последующей обработкой пероксидом водорода лигноцеллюлозы (образец 10) приводит к повышению степени кристалличности, значение которой составляет 80 %. В результате S-эмульгирования сырья в водной среде (образец 11) значение СК понижается до 66,3 %, что указывает на аморфизацию образца в процес-

Таблица 3 – Экспериментальные и расчетные данные дифрактограмм лигноцеллюлоз, выделенных из соломы ржи

Образец	2θ , град	I_{002}	2θ , град	I_{am}	СК, %
10	22,85	2734	18,95	545	80,1
11	22,50	1752	18,85	590	66,3
15	22,35	3070	18,50	1144	62,7

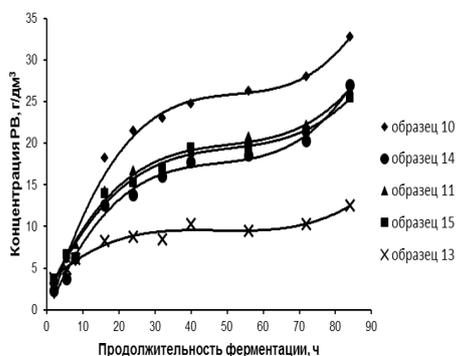


Рисунок 3 – Зависимость концентрации РВ в пересчете на глюкозу от продолжительности ферментации лигноцеллюлозных материалов, полученных из соломы ржи химическими и механохимическими обработками

се обработки. Комбинация механоакустических воздействий на макромолекулу лигноцеллюлозы (образец 15) способствует еще большей аморфизации продукта, СК составляет 62,7 %.

Полученные образцы лигноцеллюлоз были использованы в качестве субстратов для гидролиза ферментным комплексом, состоящим из препаратов «Брюзайм ВГХ» и «Целлолюкс-А». Реакционную способность лигноцеллюлоз при ферментативном гидролизе оценивали по накоплению редуцирующих веществ (РВ) в гидролизатах в течение 84 ч. На рисунке 3 представлена зависимость концентрации РВ (г/дм³) в пересчете на глюкозу от продолжительности ферментации исследуемых субстратов, в таблице 4 – конечные концентрации РВ и пентоз, а также выход РВ после 84 ч ферментативной обработки.

Показано, что исследуемые субстраты на основе соломы ржи характеризуются постепенным накоплением РВ в гидролизатах, причем более эффективно из рассматриваемых субстратов ферментативный гидролиз протекает на субстрате № 10. Концентрация РВ через 72 ч обработки составляет 28 г/дм³. Повторная добавка ферментативного препарата в субстрат способствует повышению содержания РВ в гидролизате за 12 ч обработки на 4,75 г/дм³ (конечная концентрация РВ 32,75 г/дм³), что составляет лишь 15 % от предыдущего значения. Конечный выход РВ после 84 ч гидролиза составляет 88,4 %.

Образцы 11, 14 и 15, полученные в результате обработок, сочетающих механические и химические воздействия, также характеризуются высоким содержанием РВ в гидролизатах, после 72 ч обработки их значения составляют 22,25, 20,25 и 21,50 г/дм³, соответственно. Продолжение ферментативного гидролиза в течение 12 ч при добавлении новой порции препарата повышает концентрацию РВ от 16 % до 25 %, достигая к 84 ч обработки 26,50, 27,00, 25,5 г/дм³. В этом случае конечная концентрация РВ составляет 71,6 %, 72,7 % и 68,9 % соответственно. Таким образом, по увеличению количества редуцирующих веществ в пересчете на глюкозу по окончании ферментативной обработки исследуемые субстраты можно выстроить в ряд (10)

> (14) > (11) > (15) > (13), заключив тем самым, что наибольшей реакционной способностью характеризуется образец лигноцеллюлозы, полученный из соломы ржи сульфитным способом с последующей обработкой стабили-

зированным раствором пероксида водорода. При этом вклад пентоз в выход РВ составляет всего 13 %, что свидетельствует о получении глюкозо-пентозного гидролизата с преимуществом именно глюкозы.

Таблица 4 – Характеристики гидролизатов после ферментации субстратов в течение 84 ч

Образец	Конечная концентрация РВ в пересчете на глюкозу, г/дм ³	Выход РВ в пересчете на глюкозу, %	Конечная концентрация пентозанов, г/дм ³
10	32,75	88,4	4,45
11	26,50	71,6	4,70
13	12,50	33,8	3,90
14	27,00	72,7	1,30
15	25,50	68,9	0,31

ВЫВОДЫ

Изучено влияние методов выделения лигноцеллюлозы из соломы ржи и подготовки субстратов на ее основе на реакционную способность к ферментализу.

Показана зависимость доброкачественности субстрата от содержания лигнинной компоненты и степени кристалличности исследуемых образцов лигноцеллюлозы.

При этом трудно сделать определенное заключение о том, что определяет в большей степени повышение эффективности ферментативного гидролиза – уменьшение степени кристалличности целлюлозы, либо увеличение поверхности, доступной для действия ферментов.

Но, несомненно, лигноцеллюлозные материалы, подготовленные на основе соломы ржи, являются перспективными субстратами для получения глюкозо-пентозных гидролизатов с преимущественным содержанием глюкозы (70-88 %).

Работа выполнена при поддержке совместного проекта фундаментальных исследований № 12-С-3-1007, выполняемого ИХ Коми НЦ УрО РАН совместно с ИПХЭТ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. El-Zawawy W.K., Ibrahim M.M., Abdel-Fattah Y.R., Soliman N.A., Mahmoud M.M. Acid and enzyme hydrolysis to convert pretreated lignocellulosic materials into glucose for ethanol production // Carbohydrate Polymers. – 2011. – V. 84. – P. 865-871.
2. Макарова Е.И., Будаева В.В., Митрофанов Р.Ю. Использование мультисубстратных композиций для гидролиза нетрадиционного целлюлозосодержащего сырья // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4-1. – С. 192-198.
3. Будаева В.В., Скиба Е.А., Макарова Е.И.,

Золотухин В.Н., Сакович Г.В., Удоратина Е.В., Кувшинова Л.А., Щербакова Т.П., Кучин А.В. Получение лигноцеллюлозных материалов из недревесного сырья и исследование их в качестве субстратов ферментативного гидролиза // Ползуновский вестник. – 2013. – № 1. – С. 215-219.

4. Brethauer S., Wyman Ch. E. Review: Continuous hydrolysis and fermentation for cellulosic ethanol production // Bioresource Technology. – 2010. – V. 101. – P. 4862-4874.

5. Клесов А.А., Сеницын А.П. Влияние физико-химических и структурных факторов целлюлозы на эффективность ее ферментативного гидролиза // Биоорганическая химия. – 1981. – Т. 7, № 12. – С. 1801-1812.

6. Ломовский О.И. Обработка дисперсных материалов и сред. // Межд. периодический сб. научн. трудов. – Изд.: Одесса, 2002. – Вып. 12. – С. 133-149.

7. Шаполова Е.Г., Бычков А.Л., Ломовский О.И. Механическая активация процесса ферментативного осахаривания углеводов рисовой шелухи // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – № 5. – С. 639-644.

8. Demin V.A., Udoratina E.V., Scherbakova T.P. Acid-Catalytic and Acid-Electrophilic Activation of Lignin before the Delignification by Hydrogen Peroxide // Fifth European Workshop on Lignocellulosics and Pulp. Advances in Lignocellulosics Chemistry for Ecologically Friendly Pulping and Bleaching Technologies/ Proceedings. University of Aveiro, Portugal. – 1998. – P. 137-140.

9. Cao Y, Tan H. Study on crystal structures of enzyme-hydrolyzed cellulosic materials by X-ray diffraction // Enzyme Microb. Tech. – 2005. – V. 36. – N 2. – P. 314-317.

10. Щербакова Т.П., Котельникова Н.Е., Быховцова Ю.В. Сравнительные изучения образцов порошковой и микрокристаллической целлюлозы различного природного происхождения. Надмолекулярная структура и химический состав порошковых образцов // Химия растительного сырья. – 2012. – № 2. – С. 5-14.

Щербакова Татьяна Петровна, научный сотрудник лаборатории химии растительных полимеров, кандидат химических наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИХ Коми НЦ УрО РАН), sher.@tatymail.ru, ул. Первомайская, 48, Сыктывкар, 167982, Россия. Тел. (8212) 21-99-61, факс (8212) 21-84-77.

Удоротина Елена Васильевна, заведующая лабораторией химии растительных полимеров, кандидат химических наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИХ Коми НЦ УрО РАН), udoratina-ev@chemi.komisc.ru, ул. Первомайская, 48, Сыктывкар, 167982, Россия. Тел. (8212) 21-99-61, факс (8212) 21-84-77.

Макарова Екатерина Ивановна, младший научный сотрудник лаборатории биоконверсии, аспирант Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), massl@mail.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-59-85, факс (3854) 30-17-25.

Будаева Вера Владимировна, заведующая лабораторией биоконверсии, кандидат химических наук, доцент Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), budaeva@ipcet.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-59-85, факс (3854) 30-17-25.

УДК 661.728.7:577.152.3

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРМЕНТОЛИЗА ГИДРОТРОПНЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗ

В.В. Будаева, Е.И. Макарова, М.Н. Денисова, И.Н. Павлов, Г.В. Сакович

Исследован ферментативный гидролиз технических и облагороженных целлюлоз, полученных гидротропным способом из мискантуса и плодовых оболочек овса, с применением промышленных ферментных препаратов. Показано, что выход редуцирующих веществ достигает 55-92 % от массы субстрата. Установлено, что добавление поверхностно активного вещества «Твееп 80» обеспечивает увеличение эффективности ферментолиза технической целлюлозы на 12 %.

Ключевые слова: гидротропная варка, мискантус, плодовые оболочки злаков, целлюлоза, ферментативный гидролиз, «Целлолюкс-А», «Брюзайм ВГХ», Твееп 80, редуцирующие вещества, глюкоза.

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальные исследования ферментолиза целлюлозы являются предметом междисциплинарного изучения в связи с наличием закономерностей между реакционной способностью целлюлозы к ферментолиту и физико-химическими свойствами и структурными характеристиками целлюлозного субстрата [1]. Поскольку свойства и характеристики субстрата в первую очередь определяются способом получения целлюлозы и методами подготовки к ферментолиту, и отсутствуют сведения о результатах ферментолиза гидротропных целлюлоз, за исключением работы [2], то необходимо было провести сравнительный анализ результатов ферментолиза гидротропных целлюлоз, полученных из разных видов сырья, а также технических и облагороженных между собой. Кроме того, известны способы активации ферментолиза добавками органи-

ческих веществ [3].

Целью данной работы является исследование реакционной способности технических и облагороженных целлюлоз, полученных гидротропным способом из мискантуса и плодовых оболочек овса, а также влияния поверхностно активного вещества «Твееп 80» на эффективность ферментолиза.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Гидротропная делигнификация мискантуса и плодовых оболочек овса (ПОО) проведена на качающемся автоклаве [4] и на универсальной термобарической установке (УТБ) [5] в условиях, описанных ниже.

Варка в автоклаве состояла из предварительного гидролиза двух видов сырья при температуре 140 °С без выдержки по времени (модуль 1:8), затем полученную лигноцеллюлозу варили в 30 %-ном растворе бензоата натрия при тем-