

Павлов Игорь Николаевич, научный сотрудник лаборатории биоконверсии, кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), rawlow-in@mail.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-59-85.

Обрезкова Марина Викторовна, научный сотрудник лаборатории биоконверсии, кандидат технических наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), ipcet@mail.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-15-28.

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.

Сакович Геннадий Викторович, научный руководитель ИПХЭТ СО РАН, советник РАН, доктор технических наук, академик РАН Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), admin@ipcet.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-59-

55, факс (3854) 31-17-25.

Кашковский Владимир Ильич, заместитель директора по научной работе, заведующий отделом органического и нефтехимического синтеза, старший научный сотрудник, кандидат химических наук Института биоорганической химии и нефтехимии Национальной академии наук Украины (ИБОНХ НАН Украины), kash-vik@yandex.ua; kashkovsky@bpci.kiev.ua, bessi012@mail.ru, ул. Мурманская, 1, г. Киев-94, ГСП 660, 02660, Украина. Тел. (044) 559-20-71, факс (044) 559-98-00.

Евдокименко Виталий Александрович, старший научный сотрудник, кандидат химических наук Института биоорганической химии и нефтехимии Национальной академии наук Украины (ИБОНХ НАН Украины), vau.77@mail.ru, ул. Мурманская, 1, г. Киев-94, ГСП 660, 02660, Украина. Тел. (044) 559-70-60, факс (044) 559-98-00.

Каменских Дмитрий Сергеевич, старший научный сотрудник, кандидат химических наук Института биоорганической химии и нефтехимии Национальной академии наук Украины (ИБОНХ НАН Украины), kam04@mail.ru, ул. Мурманская, 1, г. Киев-94, ГСП 660, 02660, Украина. Тел. (044) 559-70-60, факс (044) 559-98-00.

Кухарь Валерий Павлович, директор ИБОНХ НАН Украины, доктор химических наук, профессор, академик НАН Украины Института биоорганической химии и нефтехимии Национальной академии наук Украины (ИБОНХ НАН Украины), kukhar@bpci.kiev.ua, ул. Мурманская, 1, г. Киев-94, ГСП 660, 02660, Украина. Тел. (044) 558-53-88, факс (044) 573-25-52.

УДК 661.728.7:577.152.3

К ВОПРОСУ О РОЛИ СТЕПЕНИ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПРИ ФЕРМЕНТАТИВНОМ ГИДРОЛИЗЕ

Макарова Е.И.¹, Будаева В.В.¹, Золотухин В.Н.¹, Ляханова И.В.², Алешина Л.А.²

Исследована реакционная способность к ферментации субстратов – промежуточных и целевых продуктов азотнокислой обработки мискантуса. Показано, что несмотря на высокие значения степени кристалличности и степени полимеризации целлюлозы в субстратах (65-72 % и 1000-1080 соответственно), выходы редуцирующих веществ от массы субстратов имеют значения в диапазоне 80-86 %. Установлено, что источником преимущественно гексозных гидролизатов может быть лигноцеллюлозный материал – промежуточный продукт азотнокислой обработки с массовой долей лигнина 9 %.

Ключевые слова: азотнокислая обработка, мискантус, целлюлозосодержащий продукт, лигноцеллюлозный материал, целлюлоза, ферментативный гидролиз, «Брюзайм ВГХ», «Целлолюкс-А», «Рапидаза ЦР», редуцирующие вещества.

ВВЕДЕНИЕ

Реакционная способность целлюлозы к ферментации зависит от физико-химических свойств субстрата: степени измельчения, удельной площади поверхности, а также сте-

пени кристалличности и степени полимеризации. Во многих работах [1-4] отмечено наличие четкой корреляции между реакционной способностью целлюлозы при ферментативном гидролизе и степенью ее кристалличности для

субстратов с низкой массовой долей остаточного лигнина. Однако в связи с обнаружением противоположных результатов [5, 6] данный вопрос остается открытым для активных фундаментальных исследований. Аналогичная ситуация складывается с зависимостью скорости ферментативного гидролиза от степени полимеризации целлюлозы [7].

Целью данной работы является исследование реакционной способности субстратов – промежуточных и целевых продуктов азотно-кислой варки мискантуса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения субстратов были проведены следующие стадии азотно-кислой варки мискантуса: предварительный гидролиз измельченного мискантуса 0,5-1,0 %-ным раствором азотной кислоты с получением целлюлозосодержащего продукта (ЦСП), затем азотно-кислая варка ЦСП в 4 %-ном растворе азотной кислоты с получением лигноцеллюлозного материала (ЛЦМ), затем обработка ЛЦМ 2 %-ным раствором гидроксида натрия с получением технической целлюлозы (Ц1), декатионирование Ц1 обработкой 1 %-ным раствором азотной кислоты с получением целевой целлюлозы Ц2 [8].

Массовую долю (м.д.) в пересчете на абсолютно сухое сырье (а.с.с.) золы, м.д. кислотонерастворимого лигнина, м.д. α -целлюлозы, м.д. пентозанов в субстратах определяли по стандартным методикам анализа [9].

Степень полимеризации (СП) целлюлоз определяли по вязкости растворов в кадоксене на вискозиметре типа ВПЖ-3 [10].

Рентгенограммы образцов ЛЦМ, Ц1 и Ц2 были получены на дифрактометре ДРОН-3М в геометрии на отражение FeK α излучении с монохроматизацией падающих лучей кристаллом пиролютического графита, установленного в первичных лучах. Сканирование рентгеновских дифракционных картин осуществлялось в интервале углов рассеяния 2θ от 3 до 145 °С с шагом 0.1 °С. Время регистрации интенсивности в точке – 20 с. Кривые распределения интенсивности рассеяния ЛЦМ, Ц1 и Ц2 представлены на рисунке 1. Из интегральных интенсивностей отражений и диффузного фона аморфной составляющей рентгенограмм рассчитывались значения степени кристалличности (СК) по методу Руланда: $СК = (I - I_a)/I$, где I – суммарная интегральная интенсивность рассеяния кристаллической и аморфной фаз, I_a – интенсивность рассеяния аморфной фазой [11, 12].

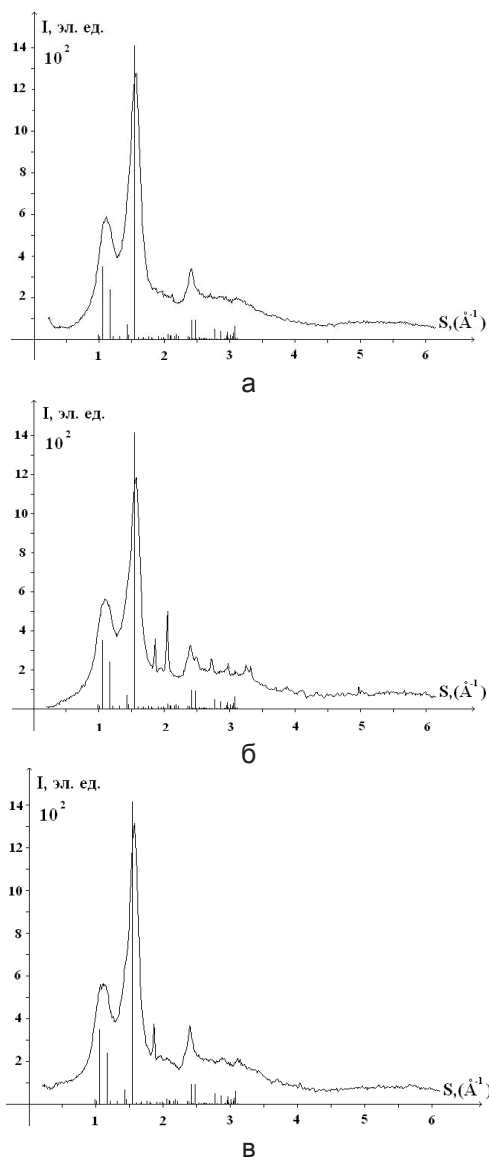


Рисунок 1 – Нормированные кривые распределения интенсивности рассеяния образцами ЛЦМ, Ц1 и Ц2 в сравнении с теоретической штрихдиаграммой целлюлозы 1b с антипараллельным расположением молекул
а – ЛЦМ; б – Ц1; в – Ц2.

Для гидролиза субстратов использовали композицию из ферментных препаратов (ФП) «Брюзайм ВГХ», «Рапидаза ЦР» (поставщик компания «Русфермент», г. Москва) и «Целлолюкс-А» (производитель ООО ПО «Сиббиофарм»). В соответствии с рекомендациями поставщиков расходы ФП «Брюзайм ВГХ» и «Рапидаза ЦР» на 1 г субстрата составили 0,02 см³, «Целлолюкс-А» – 0,02 г.

Гидролиз осуществляли в ацетатном буфере (рН 4,7) при температуре (50±2) °С и

постоянном перемешивании в течение 72 ч с начальной концентрацией субстрата 33 г/л (а.с.в.) по методике [13]. Следует отметить, что субстраты ферментировались влажными, за исключением ЦСП.

Для контроля концентрации редуцирующих веществ (РВ) каждые 8 ч проводили отбор проб объемом 2 см³. Концентрацию РВ в пересчете на глюкозу определяли на спектрофотометре «UNICOUV-2804» (США) с использованием динитросалицилового реактива. Выход РВ (отношение массы РВ к массе субстрата) рассчитан с учетом коэффициента, связанного с присоединением молекулы воды к ангидроглюкозным остаткам соответствующих мономерных звеньев в результате ферментативного гидролиза. По окончании ферментации реакционную массу фильтровали с получением готового гидролизата и твердого осадка остатков субстрата.

Концентрацию пентоз в пересчете на ксилозу в готовых гидролизатах определяли по модифицированной методике [14] спектрофотометрическим методом с использованием орсина.

Результаты и обсуждение

Характеристики продуктов азотнокислой варки мискантуса ЦСП, ЛЦМ, Ц1 и Ц2 приведены в таблице 1.

Последовательная химическая обработка мискантуса приводит к увеличению м.д. целлюлозы с 62,8 % в ЦСП до 95,5 % в Ц2, снижению м.д. легкогидролизуемых компонентов – пентозанов с 9,6 % в ЦСП до 1,2 % в Ц2, уменьшению м.д. остаточного лигнина с 20,9 % в ЦСП до 3,0 % в Ц2. Зольность увеличивается

с 2,0 % в ЦСП до 7,0 % в Ц1, последующая обработка Ц1 1 %-ным раствором азотной кислоты приводит к снижению м.д. золы в Ц2 до 2,2 % (таблица 1).

СК целлюлозы в субстратах ЛЦМ, Ц1 и Ц2 характеризуются достаточно высокими значениями более 50 %: образцы ЛЦМ и Ц1 65-66 %, образец Ц2 еще выше – 72 %. СК целлюлозы в образце ЦСП не определялся, но в таблице указано значение СК целлюлозы в нативном мискантусае, определенное вышеуказанным методом [11].

Степени полимеризации целлюлоз находятся на одном уровне: 1005 для образца Ц1 и 1060 для образца Ц2. Данный факт свидетельствует о том, что описанная выше химическая обработка ЛЦМ не оказывает сильного деструктирующего воздействия на целлюлозу.

Оценка реакционной способности к ферментации субстратов проводилась по концентрации образующихся РВ в реакционной массе и скорости их накопления. Зависимость концентрации РВ от продолжительности ферментативного гидролиза представлена на рисунке 2.

Наименьшей реакционной способностью, как и ожидалось, характеризуется образец ЦСП, что можно объяснить высокой прочностью материала, обусловленного химическими и межмолекулярными взаимодействиями целлюлозы с другими биополимерами: лигнином (21 %) и гемицеллюлозами (10 %). Выход РВ за первые 8 ч достиг всего 12 % и медленно увеличивался в течение последующих 56 ч до 18 %.

Таблица 1 – Характеристики субстратов

Субстрат	Влажность, %	М.д., %				Характеристики целлюлозы	
		α-целлюлозы	остаточного лигнина	пентозанов	золы	СП	СК**, %
ЦСП	7,9	62,8*	20,9	9,6	2,0	–	≈46
ЛЦМ	77,6	79,9	8,8	4,7	3,7	–	66
Ц1	77,4	89,6	2,6	1,3	7,0	1005	65
Ц2	75,0	95,5	3,0	1,2	2,2	1060	72

* – м.д. целлюлозы по Кюршнеру; ** – погрешность метода ΔСК=±5 %

Наиболее интересные результаты получены для трех субстратов ЛЦМ, Ц1 и Ц2, а именно: начальные скорости реакции для ЛЦМ и целлюлозных субстратов различны; выход РВ составляет для ЛЦМ – 40 %, Ц1 и

Ц2 – 65-67 %. После 8 ч реакции характер кинетической зависимости для ЛЦМ отличается от результатов для субстратов Ц1 и Ц2: скорость реакции снижается, наблюдается плавный рост выхода РВ и выход на плато 77-78

% через 32 ч гидролиза. Это можно объяснить многокомпонентным составом субстрата и присутствием в матрице лигнина (8,8 %), золы (3,7 %) и пентозанов (4,7 %). Зависимость выхода РВ от времени гидролиза субстратов Ц1 и Ц2 совпадают в первые 8 ч 65-66 %, затем немного «расходятся» в интервале 2,0-2,5 %, сохранив данное значение в течение длительного времени – 56 ч. Следует отметить, что образцы Ц1 и Ц2 практически максимально гидролизуются за 24 ч реакции (81 % и 85 % соответственно) и дальнейшего прироста РВ практически не происходит.

Сравнивая результаты ферментативного гидролиза (рисунок 2, таблица 2), видно, что наибольшей реакционной способностью обладает Ц2 (выход РВ – 86 %), что объясняется химическим составом субстрата – наименьшим содержанием негидролизующих примесей: лигнина и золы.

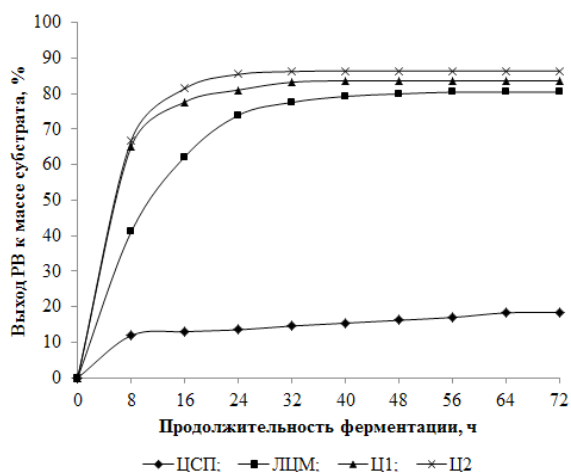


Рисунок 2 – Зависимость выхода РВ от продолжительности ферментации ЦСП, ЛЦМ, Ц1 и Ц2, полученных из мискантуса

Близкие значения выхода РВ наблюдаются при гидролизе ЛЦМ и Ц1 (92 % и 93 % соответственно), доказывая, что дополнительная обработка ЛЦМ гидроксидом натрия не приво-

дит к значительному увеличению реакционной способности к ферментации полученной таким образом целлюлозы.

Результаты определения конечных концентраций пентоз в пересчете на ксилозу соответствуют м.д. пентозанов в сырье. Пентозы являются минорной фракцией сахаров гидролизатов для всех субстратов, кроме ЦСП. Это свидетельствует о перспективности использования ЛЦМ без дальнейшей химической обработки для получения продуктов с преобладающим содержанием именно глюкозы.

В результате проведенных исследований обнаружено уникальное явление: выход РВ (на гидролизующие компоненты) при гидролизе образца ЛЦМ с м.д. лигнина 9 % составляет 92 %, что можно объяснить отсутствием ингибирующего действия у кислотонерастворимого лигнина в составе ЛЦМ. Частично окисленный лигнин в процессе ферментативной деструкции «выходит» из состава матрицы, его доля в реакционной массе увеличивается, но это не снижает активность ферментных препаратов. Такое явление можно связать с отсутствием у частично окисленного в процессе получения ЛЦМ лигнина функциональных групп, способных дезактивировать ферментные препараты.

Обнаружена высокая реакционная способность у субстратов ЛЦМ, Ц1 и Ц2 с достаточно высокой СК целлюлозы (от 65 % до 72 %), степени конверсии этих субстратов находятся в пределах 91-93 % (на гидролизующие компоненты).

Согласно классической литературе [1], целлюлозы с СП 800-1200 (хлопковый лент – 950-1200, регенерированная целлюлоза – 800-980) имеют в 4-5 раз меньшую реакционную способность к ферментации, чем целлюлозы с маленькой СП (измельченный лент – 280-320, микрокристаллическая целлюлоза – 160-170). Однако в нашем случае целлюлозы-субстраты со значением СП 1000 характеризуются высокими значениями выхода РВ 91-93 % (на гидролизующие компоненты).

Таблица 2 – Результаты ферментации

Показатель	ЦСП	ЛЦМ	Ц1	Ц2
Конечная концентрация РВ, г/л	6,8	29,8	31,0	32,0
Конечная концентрация пентоз, г/л	0,6	1,0	0,4	0,3
Выход РВ, % от начальной массы субстрата с вычетом негидролизующих примесей	18,4 23,9	80,4 91,9	83,6 92,5	86,4 91,1

В результате исследования ферментативного гидролиза технических целлюлоз из мискантуса (СК одной из которых составила 63 %), проведенного ранее [15] в сравнении с субстратом хлопковой целлюлозы (м.д. α-целлюлозы 98,8 %, СП 1018, СК 81 %) было обнаружено, что выход РВ целлюлозы из мискантуса превышал данные хлопковой целлюлозы в 4 раза (86 % против 22 %).

ВЫВОДЫ

Исследован ферментативный гидролиз продуктов азотнокислой варки мискантуса, и показано, что, несмотря на высокие значения СК и СП целлюлозы в образцах ЛЦМ, Ц1 и Ц2 (65-72 % и 1000-1080 соответственно), выходы РВ от массы субстратов имеют значения в диапазоне 80-86 %, что подтверждает неожиданно высокую степень конверсии. Кроме того, установлено, что источником преимущественно гексозных гидролизатов могут быть не только целлюлозы, но и ЛЦМ без дальнейшей химической обработки – промежуточный продукт азотнокислой обработки мискантуса с массовой долей лигнина 9 %.

* Данная работа выполнена при поддержке партнерского проекта фундаментальных исследований № 11, проводимых СО РАН совместно с УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синицын А.П., Гусаков А.В., Черноглазов В.М. Биоконверсия лигноцеллюлозных материалов. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 224 с.
2. Makoto Yoshida, Yuan Liu and et al. Effects of cellulose crystallinity, hemicellulose, and lignin on the enzymatic hydrolysis of *Miscanthus sinensis* to monosaccharides // *Biosci. Biotechnol. Biochem.* – 2008. – Vol. 72. – P. 805-810.
3. Zhu L., O'Dwyer J.P., Chang V.S., Granda C.B., Holtzapfle M.T. Structural features affecting biomass enzymatic digestibility // *Bioresource Technol.* – 2008. – № 99. – P. 3817-3828.
4. Ioelovich M., Morag E. Effect of cellulose structure on enzymatic hydrolysis // *Bioresources.* – 2011. – № 6. – P. 2818-2835.
5. Puri V.P. Effect of crystallinity and degree of polymerization of cellulose on enzymatic saccharification // *Biotechnol. Bioeng.* – 1984. – № 26. – P. 1219-1222.
6. Thompson D.N., Chen H.C., Grethlein H.E. Comparison of pretreatment methods on the basis of available surface-area // *Bioresource Technol.* – 1992. – № 39. – P. 155-163.
7. Hu Z., Ragauskas A.J. Hydrothermal pretreatment of switchgrass // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2011. – V. 50. – P. 4225-4230.

8. Пат. 2448118 Россия, С 1. Способ получения целлюлозы из недревесного растительного сырья с содержанием нативной целлюлозы не более 50 % и способ получения из нее карбоксиметилцеллюлозы / Будаева В.В., Обрезкова М.В., Золотухин В.Н., Сакович Г.В., Сысолятин С.В. – № 2010145721; заявлено 09.11.2010; опубл. 20.04.2012, Бюл. № 11. – 10 с.

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

10. ГОСТ 25438-82. Целлюлоза для химической переработки. Методы определения характеристической вязкости. Издание официальное. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 20 с.

11. Алешина Л.А., Люханова И.В., Будаева В.В., Золотухин В.Н., Митрофанов Р.Ю., Сакович Г.В. Результаты рентгеноструктурного анализа недревесных целлюлоз // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2011. – № 8 (121). – С. 114-117.

12. Thygesen A., Oddershede J., Lilholt H., Thomsen A. B., Stahl K. On the determination of crystallinity and cellulose content in plant fibres // *Cellulose.* – 2005. – № 12. – P. 563-576.

13. Макарова Е.И. Результаты ферментации целлюлозы мискантуса в ацетатном буфере и водной среде // Химия в интересах устойчивого развития. – 2013. – Т. 21. – № 2. – С. 219-225.

14. ГОСТ 10820-75. Целлюлоза. Метод определения массовой доли пентозанов. Издание официальное. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 8 с.

15. Макарова Е.И. Исследование ферментативного гидролиза технических целлюлоз мискантуса и плодовых оболочек овса / 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. 55-57.

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.

Золотухин Владимир Николаевич, старший научный сотрудник лаборатории биоконверсии, кандидат технических наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибир-

ского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), ipcet@mail.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-14-73.

Люханова Инна Владимировна, инженер кафедры общей физики физико-технического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), luhanova@yandex.ru, пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Россия. Тел. (8142) 71-96-54.

Алешина Людмила Александровна, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, кандидат физико-математических наук Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), aleshina@psu.karelia.ru, пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Россия. Тел. (8142) 71-96-54, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-

УДК 661.728.7:66.083.4

ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ К ФЕРМЕНТАТИВНОМУ ГИДРОЛИЗУ СУБСТРАТОВ НА ОСНОВЕ ПРОДУКТОВ БЕЗРЕАГЕНТНОГО МЕТОДА ПРЕДОБРАБОТКИ ПЛОДОВЫХ ОБОЛОЧЕК ОВСА

И.Н. Павлов¹, Е.И. Макарова¹, Д.А. Чибиряев^{1,2}

Проведено исследование зависимости реакционной способности к ферментации субстратов на основе продуктов, полученных на универсальной термобарической установке. В качестве субстратов использованы образцы волокнистых продуктов после обработки в условиях термобарического воздействия с декомпрессией и гидротермической обработки, а также техническая целлюлоза после облагораживания волокнистого продукта. Установлено, что волокнистый продукт после обработки в динамичном режиме обладает реакционной способностью к ферментации в 2,5 раза выше по отношению к продукту, полученному обработкой в статичном режиме. Показана целесообразность применения технологии термобарического воздействия при введении динамичного режима прогрева и выдержки продукта.

Ключевые слова: ферментативный гидролиз, реакционная способность, целлюлоза, недревесное целлюлозосодержащее сырье, термобарическое воздействие, гидротермическая обработка.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что целлюлозосодержащее сырье (ЦСС) довольно устойчиво к ферментативному гидролизу, что связано с наличием прочной матрицы, образованной лигнином, целлюлозой и гемицеллюлозами. С целью обеспечения доступности полимерных цепей целлюлозы для действия ферментов проводится предварительная обработка лигноцеллюлозного сырья [1, 2]. Особое внимание уделяется безреагентному методу воздействия для получения субстратов, обладающих высокой реакционной способностью к ферментативному гидролизу [3-5].

Целью данной работы являлось изучение реакционной способности к ферментативному гидролизу субстратов, полученных из пло-

дых оболочек овса на новом оборудовании – универсальной термобарической установке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Универсальная термобарическая установка (УТБ) (рисунок 1) создана для расширения возможностей метода термобарической обработки. На данном виде оборудования апробированы методики: 1) термобарического воздействия (ТБВ) на исходное сырье в водной среде и 2) гидротермической обработки (ГТО). Метод ТБВ, в свою очередь, является модификацией известного метода взрывного автогидролиза, условием реализации которого является декомпрессия системы на конечной фазе проведения процесса.

По методике ТБВ обработка заключается в том, что водная суспензия исходного сырья помещается в реакционную камеру и усредняется посредством перекачивания на платформе. После чего реактор устанавливается на сборник и вся последующая обработка (нагрев до заданных значений температуры и