

М.В. Постникова, М.Е. Митракова, А.П. Павлова

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МАКУЛАТУРНОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ БИОЭТАНОЛА

В условиях повышения цен на нефть и природный газ, а также истощения мировых запасов этого сырья неуклонно возрастает интерес к использованию альтернативных источников энергии. Традиционно этиловый спирт (биоэтанол) получают из пищевых продуктов. Для замены пищевых продуктов в производстве биоэтанола ведутся активные поиски экономически и экологически приемлемой технологии получения биоэтанола из целлюлозы, содержащейся в отходах лесной, целлюлозной и деревообрабатывающей промышленности. Основное внимание уделено изучению стадий предподготовки макулатурного сырья, изучению изменений в составе и структуре макулатурной массы физико-химическими методами (ИК-Фурье-спектроскопический, рентгенофазовый, микроскопический и гранулометрический анализы) и изучению ферментативного гидролиза. В работе изучалась предподготовка макулатурного сырья, включающая роспуск (разволокнение), подмол и термохимическую обработку.

Термохимическая обработка проводилась в щелочной среде при температурах 95 и 120 °С. Результаты планирования и оптимизации эксперимента подготовки макулатуры к ферментативному гидролизу показали, что оптимальными условиями для термохимической обработки макулатуры являются следующие: расход 4 % NaOH, расход 3 % H₂O₂, температура 110 °С, продолжительность 170 мин. Изучение изменений в составе и структуре макулатурной массы физико-химическими методами показало, что в процессе предобработки макулатурного сырья в нем происходит разрыхление структуры макулатуры, наблюдаются трансформации в молекуле лигнина и изменения длины и ширины волокон массы. Такие изменения в структуре и составе макулатурной массы способствуют эффективности ферментативного гидролиза, проводимого для извлечения сахаров для биоэтанола.

При проведении ферментативного гидролиза с применением ферментного препарата «ЦеллоЛюкс-F» (целлюлозная активность составляет 2000 ед/г в течение 48 ч) с концентрацией 5 г/л получено содержание сахаров в гидролизате (РВ) 16,6 г/л. Была оценена возможность переработки сахаров, полученных из макулатурного сырья путем ферментативного и кислотного гидролиза, в этиловый спирт. Показано, что сахара гидролизата и ферментализата картонной и газетной макулатуры способны сбраживаться в этанол. Результаты свидетельствуют о потенциальной возможности использования гидролизатов макулатуры для переработки в этанол, но с целью интенсификации этого процесса необходимы дополнительные исследования с применением более активных ферментов, утилизирующих помимо гексозных и пентозных сахара.

Данные исследования подтверждают возможность применения макулатурного сырья в производстве биоэтанола.

Ключевые слова: макулатура, перекись водорода, гидроксид натрия, ИК-спектроскопия, рентгенофазовый анализ, микроскопический анализ, целлюлоза, ферментативный гидролиз, биоэтанол.

M.V. Postnikova, M.E. Mitrakova, A.P. Pavlova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEACH OF THE WASTE PAPER FOR THE PRODUCTION OF BIOETHANOL

Ethanol received from biomass has the potential to be a renewable transportation fuel. This research shows the possibility of recycling waste paper in the production of bioethanol, with emphasis given to the study of stages pretreatment waste paper, the study of changes in the composition and structure of waste paper by physical and chemical methods (FT-IR spectroscopy, X-ray, microscopic analyzes and particle size) and enzymatic hydrolysis. Such recycled raw materials for use in the hydrolysis to produce sugars, and garneting to dissolve and to obtain a fiber material with a high content of cellulose and low in lignin must be subjected to thermochemical treatment.

Thermochemical treatment carried out in an alkaline medium at a temperature of 95 and 120 °C. The results of the optimization and planning showed that the optimal conditions for the chemical treatment of waste paper are: consumption of 4 % NaOH, consumption of 3 % H₂O₂, temperature 110 °C, duration 170 min.

The study of changes of physical and chemical methods (FT-IR spectroscopy, X-ray, microscopic and particle size analysis) of samples

of waste paper has shown that loosening the structure of paper, observed the transformation of the molecule lignin and changes in the length and width of the mass of fibers and colors.

During the enzymatic hydrolysis using the enzyme preparation «CelloLux-F», cellulose whose activity is 2000 U/g at 48 hours truss drug concentration of 5 g/l obtained 16.6 g/L RS.

At the final stage of research was estimated possibility of processing of sugars obtained from waste paper by enzymatic hydrolysis alcohol. It is shown that the sugar hydrolyzate and digested fermentative cardboard and newsprint can ferment to ethanol. The results indicate the potential use of waste paper for recycling hydrolysates into ethanol, but in order to intensify this process, more research is needed with the use of more active enzymes dispose of pentose and hexose sugars.

Keyword: *waste paper, hydrogen peroxide, sodium hydroxide, infrared spectroscopy, X-ray analysis, microscopic analysis, cellulosic material, enzymatic hydrolysis, bioethanol.*

В условиях повышения цен на нефть и природный газ, а также истощения мировых запасов этого сырья неуклонно возрастает интерес к использованию альтернативных источников энергии. Сегодня две трети производимого в мире этилового спирта расходуется на топливо [1]. Необходимость перехода к топливам нового поколения обусловлена целым рядом причин: дисбалансом между растущими объемами энергопотребления и исчерпаемостью природного органического сырья, ежегодным увеличением цен на нефть, высокими затратами на обустройство новых месторождений полезных ископаемых и некоторыми экологическими проблемами [2].

В мировой практике уже широко применяется биотопливо различных видов, среди которых признанным лидером считается биоэтанол [3]. Биоэтанол – это возобновляемое спиртовое топливо, которое в основном производят из сельскохозяйственных продуктов. Для его производства можно использовать и непищевое сырье – целлюлозу многих видов растений и древесины.

На сегодняшний день Россия – единственная страна в мире, в которой накоплен многолетний промышленный опыт, позволяющий получать этанол по гидролизным технологиям. Таким образом, Россия обладает необходимыми научно-технологическими и промышленными возможностями для производства топливного этанола [3, 4].

Для производства альтернативных видов топлива помимо древесины, соломы и других целлюлозосодержащих растений представляет

интерес макулатурная масса. Вторичное волокнистое сырье – макулатура – представляет собой бывшие в употреблении бумажные и картонные изделия или печатную продукцию из бумаги (газеты, журналы) и картона, а также отходы их производства и переработки. Небеленое целлюлозное волокно содержится в различных видах картона, газетной продукции, поэтому использованную макулатуру можно рассматривать как источник целлюлозы для получения сахаров, в том числе глюкозы, необходимой для технологии биоэтанола [5]. В последние годы макулатура широко используется в композиции разных видов бумаги и картона. Однако скорость накопления макулатуры значительно превышает объем ее использования, поэтому она представляет большой интерес, как экономически доступное сырье для получения глюкозы и дальнейшего получения биоэтанола, биобутанола и других полезных продуктов. Таким образом, актуальными являются исследования по получению биоэтанола из макулатурного сырья.

Для получения сахаров из лигноцеллюлозных материалов может быть использован кислотный или ферментативный гидролиз. Более современный способ – ферментативный гидролиз, однако он предъявляет особые требования к субстрату. Таким образом, лигноцеллюлозное сырье (макулатура) до ферментативного гидролиза должно пройти предобработку, направленную на разрыхление структуры макулатурного сырья, повышение в составе сырья целлюлозы и снижение содержания в нем лигнина, снижение кристалличности целлюлозы, входящей в состав макулатурного сырья [6]. Авторами проводятся исследования по применению лигноцеллюлозного сырья в производстве биоэтанола [7, 8]. В этих работах показана возможность проведения ферментативного гидролиза древесных опилок, прошедших предобработку, включающую предгидролиз, щелочную пропитку и обработку подмолотых опилок перекисным раствором в щелочной среде. В работе [8] изучался вопрос подготовки к ферментативному гидролизу макулатурной массы из коробочного и гофрированного картона. Авторами было установлено, что для осахаривания макулатурного сырья необходимо проводить подготовку макулатуры, включающую роспуск в гидроразбавителях в щелочной среде с последующей грубой очисткой и подмолотом до 20–25 °ШР и термохимическую обработку при 95–120 °С в щелочной среде с добавкой перекиси водорода. На основании проведенного планирования и оптимизации процесса подготовки картонной макулатуры были определены оптимальные условия подготовки макулатуры: до термохимической обработки макулатура распускается при температуре 40 °С в течение

90 мин с расходом реагентов 2 % NaOH + 0,5 % H₂O₂; термохимическая обработка проводится при температуре 110 °С 170 мин с расходом реагентов 4 % NaOH + 3% H₂O₂. На рис. 1 приведена полученная поверхность функции отклика.

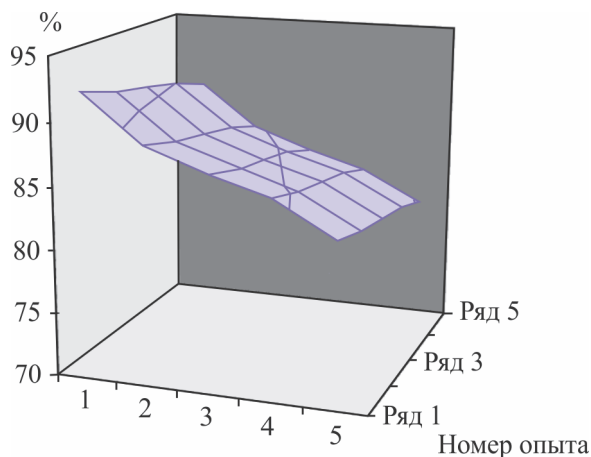


Рис. 1. Функция отклика

Задача оптимизации условий термообработки макулатурной массы состояла в минимизации выходного параметра «выход волокнистого полуфабриката». По функции отклика видим, что минимальным значением выхода полуфабриката является 80 %, который и будет оптимальным. При этом выходе был получен образец 2 (табл. 1), в котором содержание целлюлозы 68,5 %, а лигнина 8,1 %. Поскольку для субстрата, используемого для ферментативного гидролиза в технологии получения биоэтанола, одним из требований является его доступность для ферментов, что предполагается изменить в процессе подготовки, было проведено изучение изменений в структуре и составе макулатурной массы в результате ее предобработки. Об изменениях в составе и структуре макулатурной массы в результате ее предобработки перед гидролизом можно судить по результатам ИК-Фурье-спектроскопического, микроскопического, рентгенофазового, гранулометрического анализов макулатурного сырья. Анализ проводился на картонной макулатуре, характеристика которой приведена в табл. 1.

Запись ИК-спектров образцов макулатуры до и после предварительной обработки производили с использованием ИК-Фурье-спектрометра Nicolet 380 (THERMO Electron, США), снабженного приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), с кристаллом

ZnSe в диапазоне волновых чисел 4000–600 см^{-1} . Полученные спектры представлены на рис. 2, 3. Для сравнения были сняты спектры сульфатной целлюлозы как компонента картонной макулатуры (см. рис. 2). Сульфатная целлюлоза и картонная макулатура прошли предобработку, включающую разволокнение, подмол, термохимическую обработку. Условия предобработки: разволокнение с расходом реагентов 2 % NaOH + 0,5 % H_2O_2 , продолжительность разволокнения при температуре 40 °С составляла 90 мин, термохимическая обработка с расходом реагентов 4 % NaOH + 3 % H_2O_2 , продолжительность составляла 120 мин при температуре 120 °С.

Таблица 1

Характеристика образцов макулатурной массы,
используемых для изучения структуры и состава

Образцы макулатурной массы	Выход полуфабриката, % от абс. сух. мас.	Содержание в полуфабрикате, %	
		Целлюлоза	Лигнин
Картонная макулатура до обработки, образец 1	—	50,3	20,5
Картонная макулатура после предоб- работки, образец 2/3	82,3/91,8	68,5/65,1	8,1/10,5

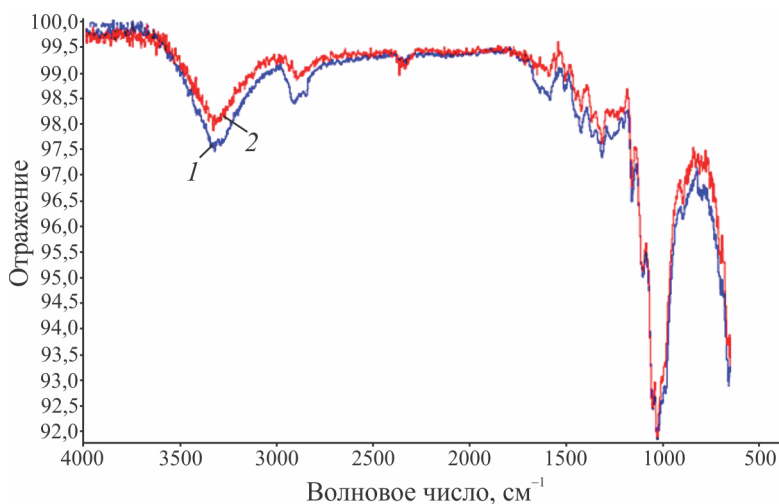


Рис. 2. ИК-Фурье спектры образцов картонной макулатуры
до (1) и после (2) обработки

ИК-спектры всех приведенных образцов макулатуры имеют сложный характер и включают полосы поглощения, отражающие колебания скелета и функциональных групп целлюлозы и лигнина, вхо-

дящих в состав лигноцеллюлозного комплекса макулатуры. Отнесение полос поглощения в ИК-спектрах образцов макулатуры и сульфатной целлюлозы проведено согласно работе [9].

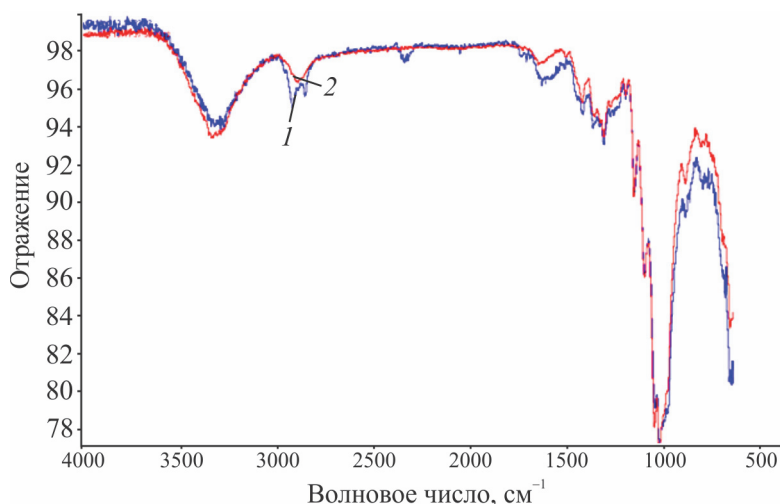


Рис. 3. ИК-Фурье спектры образцов сульфатной целлюлозы до (1) и после (2) обработки

Область ИК-спектра $3700\text{--}3100\text{ см}^{-1}$ характеризует валентные колебания различных типов гидроксильных групп, причем частоты валентных колебаний алифатических гидроксильных групп несколько выше, чем у фенольных. Установлено, что все гидроксильные группы лигнина вовлечены в водородные связи, поэтому фенольные группы пространственно затруднены. С увеличением степени замещения наблюдается сдвиг максимума полосы ν (О–Н) в сторону больших волновых чисел, что связано с перераспределением и уменьшением гидроксильных групп, вовлеченных в водородные связи.

Область $1400\text{--}1000\text{ см}^{-1}$, область спектра лигнина, характеризует различные валентные колебания С–С и С–О-связей, деформационные колебания С–Н-связи и ОН-групп. В области $1150\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ проявляются полосы поглощения валентных колебаний С–О-связей, характерных для первичных, вторичных и третичных гидроксильных групп. Обнаружению вторичных гидроксильных групп мешают полосы около $1125\text{--}1085$ и $1065\text{--}1025\text{ см}^{-1}$, характеризующие асимметричные и симметричные валентные колебания С–О–С-связи в алифатических простых эфирах. По изменению интенсивностей полос поглощения в области $1250\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ можно судить о взаимодействии той или иной гидроксильной группы.

По изменению интенсивности полос в ИК-спектрах образцов макулатуры, подвергнутых термохимической обработке, можно наблюдать, что из спектра исчезает полоса 1716 см^{-1} , характерная для лигнина. Резко ослабляется интенсивность полосы 1230 см^{-1} , соответствующей колебаниям сиригильного кольца лигнина. По этим показателям можно судить об экстракции лигнина из твердой фазы во время термохимической обработки.

В ИК-спектрах продуктов термохимической предобработки картона и сульфатной целлюлозы сохраняются полосы в области $1035\text{--}970\text{ см}^{-1}$, характерные для целлюлозы. Можно предположить, что она полностью сохраняется в образцах. Малое изменение интенсивности полос при $1425\text{--}1420$ и $898\text{--}895\text{ см}^{-1}$ говорит о сохранении целлюлозы в составе образцов макулатуры и сульфатной целлюлозы. Наблюдаемый переход лигнина из состава макулатурного образца и сульфатной целлюлозы может говорить о доступности целлюлозы к действию ферментов во время проведения ферментативного гидролиза и последующего выделения сахаров из субстрата.

В данной работе было проведено микроскопирование образцов картона и сульфатной целлюлозы до и после обработки. Образцы подвергались разволокнению, подмолу и термохимической обработке. Снимки были сняты на стереомикроскопе OLYMPUS SZX 10 с максимальной разрешающей способностью 375. На рис. 4, 5 приведены микрофотографии образцов макулатуры и сульфатной целлюлозы до и после предобработки. На микрофотографиях можем наблюдать, что термохимическая обработка, а также незначительный подмол способствуют разрыхлению структуры макулатурной массы. При этом происходит изменение длины и ширины волокон.

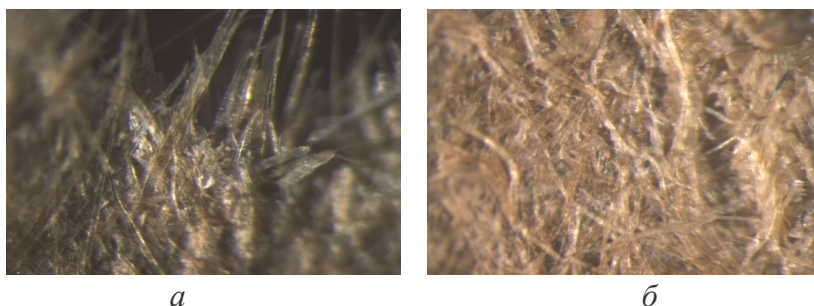


Рис. 4. Образец картона до обработки (*а*) и после обработки (*б*)

Кристалличность целлюлозы, входящей в состав лигноцеллюлозных материалов, является одним из важных факторов, влияющих на реакционную способность субстрата при ферментативном гидро-

лизе [6], поэтому в работе рассмотрено влияние предварительной предобработки макулатурного сырья на изменение структурной упорядоченности макулатуры. Съемку рентгенограмм проводили на дифрактометре ДРОН-2.0 (Россия) при скорости поворота счетчика 4 град/мин с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения в диапазоне углов $2\theta = 9^\circ \dots 35^\circ$. На рис. 6 представлены рентгенограммы образцов картонной макулатурной массы до и после обработки. Образец 2 содержит целлюлозы 68,5 %, лигнина 8,1 %, образец 3 содержит целлюлозы 65,1 %, лигнина 10,5 % (см. табл. 1).

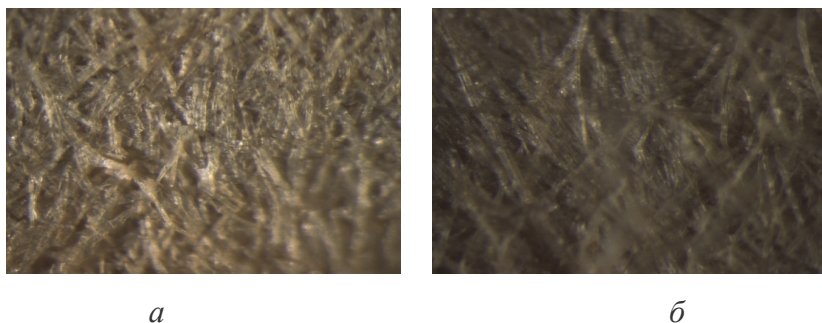


Рис. 5. Образец сульфатной целлюлозы до обработки (а) и после обработки (б)

Рентгенограммы исследованных образцов содержат четко выраженный пик при угле дифракции $2\theta \approx 22^\circ$, который служит индикатором кристаллического состояния целлюлозы и характеризует долю регулярно упакованных молекул [6].

Такие особенности представленных рентгенограмм образцов макулатурной массы можно объяснить чередованием аморфных и кристаллических участков в целлюлозе, а также наличием межмолекулярных взаимодействий целлюлозы с другими компонентами макулатурной массы (гемицеллюлозами и лигнином).

Оценка содержания кристаллической части в исследуемом образце макулатуры до и после предобработки проведена путем расчета индекса кристалличности (рис. 7), характеризующего долю регулярно упакованных молекул целлюлозы.

Индекс кристалличности целлюлозы в образце макулатурной массы составляет 60 %. После предобработки, включающей термохимическую обработку, получены значения индексов кристалличности 57,8 и 58,8 %, т.е. в данном случае термохимическая предобработка снижает индекс кристалличности целлюлозы. Уменьшение индекса кристаллич-

ности свидетельствует о том, что в ходе термохимической обработки макулатуры происходит выделение из макулатурной массы лигнина (снижение содержания лигнина) и повышение содержания целлюлозы. При этом происходит разрыхление структуры макулатурной массы, которая сопровождается деструкцией макромолекул целлюлозы. Это должно повысить эффективность ферментативного гидролиза.

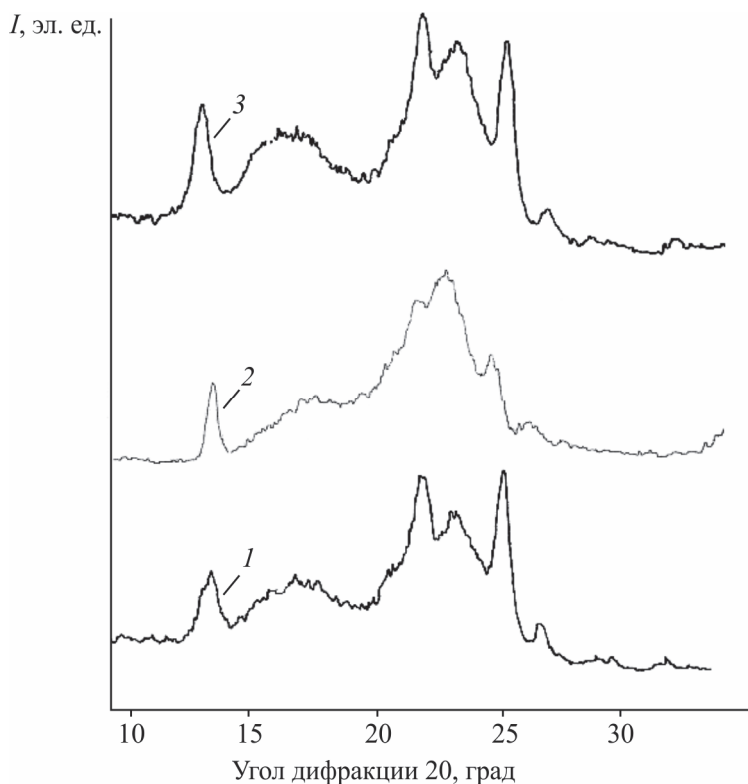


Рис. 6. Рентгенограммы образцов макулатурной массы до (1) и после (2, 3) обработки

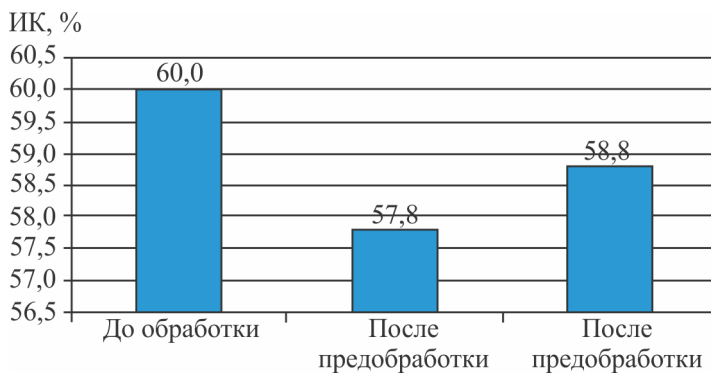


Рис. 7. Индекс кристалличности до и после предобработки

В образце преобработанной макулатуры (образец 2 – см. табл. 1) были определены размеры волокон и ряд физико-химических показателей. Использованы анализатор размеров волокон Mastersizer 2000 и микроскоп AxioImager M2m Carl Zeiss. На рис. 8 показано распределение частиц макулатурной массы по размерам. Для наглядности выполнен расчет среднего (арифметического, объемного, поверхностного) диаметра волокна. Данные приведены ниже.

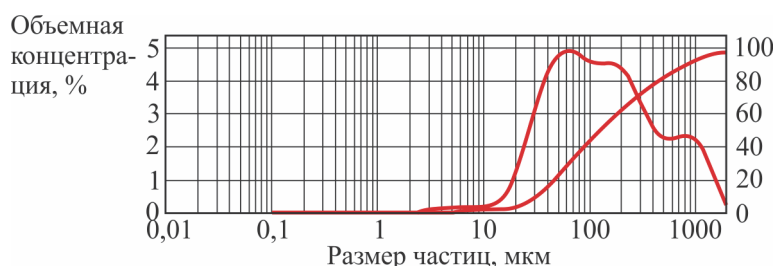


Рис. 8. Распределение частиц макулатурной массы по размерам

Размеры основных диаметров волокон картонной макулатуры:

Средний диаметр, мкм	
Арифметический	5,68
Объемный	268,0
Поверхностный	67,70

По данным рис. 8, 9 можно видеть, что для волокнистого полуфабриката, полученного из картонной макулатуры, характерна полидисперсность длины волокна со значительным преобладанием короткого волокна. Основная масса волокна характеризуется средней длиной 2,518–100,237 мкм с объемной концентрацией 3,5 и 1,5.

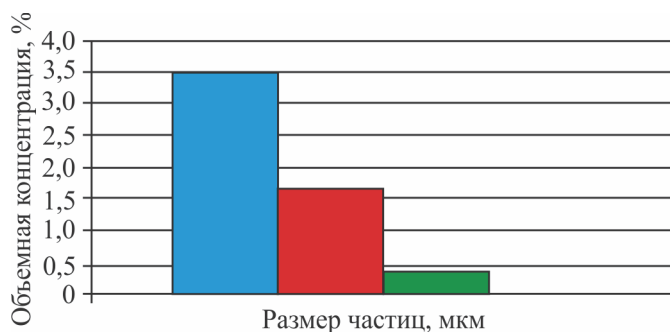


Рис. 9. Изменение длины волокон макулатуры в процессе преобработки:

■ – 2,518–100,237; ■ – 100,237–563,677; ■ – 563,677–2000

В табл. 2 приведены размеры длины и ширины волокна, определенные при помощи микроскопа Axiolmager M2m Carl Zeiss.

Таблица 2

Размеры длины и ширины волокна

Номер образца	Длина волокна, мкм	Ширина волокна, мкм
1	357,03	52,35
2	136,71	34,12
3	167,22	19,81
4	324,73	25,73
5	253,34	22,05
6	162,31	31,07
7	72,10	30,41
8	221,65	58,44
9	95,94	34,64
10	103,10	27,34

По данным табл. 2 среднее значение длины волокна равно 199,90 мкм, среднее значение ширины волокна равно 28,76 мкм. Результаты гранулометрического анализа позволяют дать следующую характеристику вторичному волокну после предобработки. Это высокополидисперсная волокнистая масса с подавляющим преобладанием фракций средней и короткой длины (длины примерно в 2 раза короче длины первичных волокон). Таким образом, при изменении длины волокна в процессе роспуска, подмола и термохимической обработки происходит изменение и других ее физико-химических свойств, которые положительно должны повлиять на процесс ферментативного гидролиза.

Изучение изменений в структуре и составе макулатурной массы в результате ее предобработки, состоящей из мокрого роспуска, подмола до 20–25° ШР, термохимической обработки, с помощью ИК-Фурье-спектроскопического, микроскопического, рентгенофазового, гранулометрического анализов макулатурного сырья показало, что данная предобработка картонной макулатуры способствует получению из картонной макулатуры волокнистого полуфабриката с измененной структурой волокна. Это должно способствовать повышению эффективности ферментативного гидролиза с целью выделения из макулатурного сырья сахаров, необходимых для микробиологической переработки их в биоэтанол, необходимости проведения предобработки с целью повышения реакционной способности макулатуры к ферментативному гидролизу. Образцы картонной и газетной макулатуры, прошедшие подготовку

по одинаковым режимам, приведенным выше для картонной макулатуры, подвергались кислотному и ферментативному гидролизу. Выход сахаров при кислотном гидролизе представлен на рис. 10.

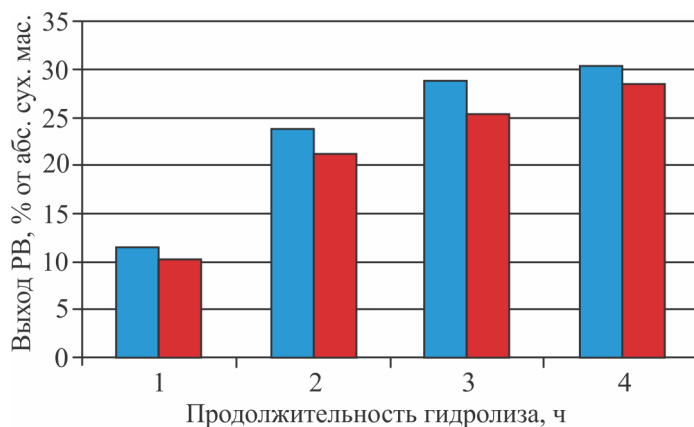


Рис. 10. Выход редуцирующих сахаров (РВ) от продолжительности гидролиза, % от абс. сух. мас.: ■ – картонная макулатура; ■ – газетная макулатура

Можно видеть, что при гидролизе образцов картонной и газетной макулатуры, полученных по одинаковому режиму предподготовки, относительно более высокий выход получен из картонной макулатуры, чем из газетной. В целом эти значения очень близки, но результаты зависят от продолжительности гидролиза.

Таким образом, кислотным гидролизом подготовленного газетного и картонного макулатурного сырья можно получить гидролизаты с содержанием (РВ) 2,5–2,8 %, что вполне приемлемо для микробиологической переработки.

Твердый остаток после гидролиза представляет собой порошковый материал, который в дальнейшем предлагается подвергать ферментативному гидролизу с целью выделения целлюлозных сахаров, необходимых для получения биоэтанола [10].

Результаты ферментативного гидролиза образцов картонной и газетной макулатуры приведены в табл. 3.

Гидролиз проводили с концентрацией фермента 2–5 г/л в течение 48 ч при температуре 50 °С с добавлением ацетатного буфера (рН = 4,7). Таким образом, при использовании ферментного препарата «Целлю-Люкс-Е» с большей целлюлозной активностью гидролиз макулатурного субстрата проходит эффективнее.

Таблица 3

Накопление сахаров в гидролизате
при ферментативном гидролизе

Образец волокнисто- го материала	Условия		Концентрация РВ, г/л				Выход РВ, % от абс. сух. мас.
	Ферментный препарат	Концентрация ферментного препарата, г/л	4 ч	8 ч	24 ч	48 ч	
Картонная макулатура	«Целлозим ультра»	2	1,7	2,0	2,3	2,4	7,2
	«ЦеллюЛюкс-Ф»	2	2,2	3,6	5,0	5,7	17,1
		3	5,4	8,4	10,6	11,6	34,8
		5	9,7	11,6	15,0	16,6	44,5
Газетная макулатура	«Целлозим ультра»	2	1,0	1,2	1,5	1,6	4,8
	«ЦеллюЛюкс-Ф»	2	1,9	3,4	4,7	5,5	16,5
		3	4,8	8,0	10,2	11,4	34,2
		5	8,6	11,4	14,1	15,4	42,1

Проводили спиртовое брожение гидролизатов. Гидролизаты направляли на сбраживание с помощью дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Брожение осуществлялось в анаэробных условиях при температуре 28 °С и pH 4,5 в течение 3 сут. Результаты сбраживания сахаров, полученных из картонного и газетного целлюлозного материала, представлены в табл 4.

Таблица 4

Результаты спиртового брожения ферментализатов
целлюлозного материала

Исходное сырье	Выход РВ, % от абс. сух. мас.		Выход спирта, % от абс. сух. макулатуры	
	Кислотный гидролиз	Ферментативный гидролиз	Кислотный гидролиз	Ферментативный гидролиз
Картонная макулатура (образец 4)	27,3	44,5	10,5	17,3
Газетная макулатура (образец 4)	25,1	42,1	9,3	15,3

Как видно из табл. 4, из гидролизата, полученного кислотным гидролизом из картонной и газетной макулатуры, был получен этанол с выходом 9,3–10,5 % от абс. сух. мас. Из гидролизата после ферментативного гидролиза из картонной и газетной макулатуры (выход РВ 42,1–44,5 %) был получен этанол с выходом 15,4–17,3 % от абс. сух. мас.

Таким образом, проведенный биосинтез этанола из сахаров гидролизатов макулатуры показал, что из макулатуры можно выделить сахара, способные сбраживаться в этиловый спирт.

В целом результаты исследований свидетельствуют о потенциальной возможности использования гидролизатов макулатуры для переработки в этанол, но с целью интенсификации этого процесса необходимы дополнительные исследования с применением ферментов с более высокой активностью и ферментацией пентозных и гексозных сахаров.

Список литературы

1. Аблаев А.Р. Большая нефть и биотопливо // Биотехнология. – 2011. – № 3. – С. 8–142.
2. Карпов С.А. Актуальные аспекты производства топливного этанола в России и за рубежом // Химия и технология топлив и масел. – 2008. – № 1. – С. 3–5.
3. Lei Wang, Mahdi Sharifzadeh, Richard Templer, Richard J. Murphy. Bioethanol production from various waste papers: Economic feasibility and sensitivity analysis // Applied Energy. – 2012. – Vol. 89, iss. 1.
4. Alya Limayema, Steven C. Ricke. Lignocellulosic biomass for bioethanol production: Current perspectives, potential issues and future prospects // Progress in Energy and Combustion Science. – 2012. – № 38. – P. 449–467.
5. Изучение процесса подготовки лигноцеллюлозного материала для ферментативного гидролиза / М.В. Постникова, Е.В. Могрицкая, А.В. Виноградова, А.П. Павлова // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Химия и биология. – 2011. – № 12. – С. 186–197.
6. Постникова М.В., Павлова А.П. Исследование ферментативного гидролиза субстрата, полученного из древесного сырья перекисным способом делигнификации // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Химическая технология и биотехнология. – 2012. – № 14. – С. 137–147.
7. Митракова М.Е., Постникова М.В. Утилизация макулатуры в производстве биоэтанола // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика: матер. X Всерос. науч.-практ. конф. – Пермь, 2013. – С. 92–95.
8. Постникова М.В., Митракова М.Е. Макулатура – сырье для производства биоэтанола // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Химическая технология и биотехнология. – 2012. – № 3. – С. 148–155.
9. Синицын А.П., Гусаков А.В., Черноглазов В.М. Биоконверсия лигноцеллюлозных материалов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. – 224 с.
10. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 496 с.

References

1. Ablaev A.R. Bolshaya neft i biotopливо [Big oil and biofuels]. *Biotekhnologiya*, 2011, no. 3. pp. 8–142.
2. Karpov S.A. Aktualnye aspekty proizvodstva toplivnogo étanola v Rossii I za rubezhom [Actual aspects of the production of ethanol fuel in Russia and abroad]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*, 2008, no. 1, pp. 3–5.
3. Lei Wang, Mahdi Sharifzadeh, Richard Templer, Richard J. Murphy. Bioethanol production from various waste papers: Economic feasibility and sensitivity analysis. *Applied Energy*. 2012, vol. 89, iss. 1.
4. Alya Limayema, Steven C. Ricke. Lignocellulosic biomass for bioethanol production: Current perspectives, potential issues and future prospects. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2012, no. 38, pp. 449–467.
5. Postnikova M.V., Mogritskaya E.V., Vinogradova A.V., Pavlova A.P. Izuchenie protsessa podgotovki lignotsellyuloznogo materiala dlya fermentativnogo gidroliza [Studying the process of preparation of lignocellulosic material for the enzymatic hydrolysis]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Khimiya i biologiya*, 2011, no. 12, pp. 186–197.
6. Postnikova M.V., Pavlova A.P. Issledovanie fermentativnogo gidroliza substrata, poluchennogo iz drevesnogo syrya perekisnym sposobom delignifikatsii [Research of enzymatic hydrolysis of the substrate produced from wood peroxide delignification]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2012, no. 14, pp. 137–147.
7. Mitrakova M.E., Postnikova M.V. Utilizatsiya makulatury v proizvodstve bioetanola [Utilization waste paper in the production of bioethanol]. *Materialy X Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Ékologiya i nauchno-tekhnicheskii progress. Urbanistika"*. Perm, 2013, pp. 92–95.
8. Postnikova M.V., Mitrakova M.E. Makulatura – syre dlya proizvodstva bioetanola [Waste paper is the raw material for the production of bioethanol]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2012, no. 3, pp. 148–155.
9. Sinitsyn A.P., Gusakov A.V., Chernoglazov V.M. Biokonversiya lignotsellyuloznykh materialov [Bioconversion of lignocellulosic materials]. Moscow: Moscovskiy universitet, 1995, 224 p.
10. Kholkin Yu.I. Tekhnologiya gidroliznykh proizvodstv [Technology of hydrolytic productions]. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1989, 496 p.

Получено 15.06.2013

Об авторах

Постникова Марина Витальевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и биотехнологии Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: postnikovamv@mail.ru).

Митракова Мария Евгеньевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры химии и биотехнологии Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: mitrakova-masha@mail.ru).

Павлова Анастасия Петровна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры химии и биотехнологии Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: anactas90@inbox.ru).

About the authors

Postnikova Marina Vitalevna (Perm, Russian Federation) – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: postnikovamv@mail.ru).

Mitrakova Mariya Evgenevna (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Chemistry and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: mitrakova-masha@mail.ru).

Pavlova Anastasiya Petrovna (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Chemistry and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: anactas90@inbox.ru).