

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ И ЕЕ НИТРАТОВ МЕТОДОМ ИК-ФУРЬЕ СПЕКТРОСКОПИИ

А. А. Корчагина, В. В. Будаева

В данной работе представлены результаты исследования нитрования технической целлюлозы, выделенной азотнокислым способом на опытном производстве из нетрадиционного ежегодно возобновляемого сырья – отходов сельскохозяйственного производства: плодовых оболочек овса и промышленной хлопковой целлюлозы. При использовании серноазотной кислотной смеси с массовой долей воды 14 % получены образцы нитратов целлюлозы, характеризующиеся близкими физико-химическими характеристиками: м.д. азота – 11,82–12,12 %, вязкость – 10–15 мПа·с, растворимость в спиртоэфирной смеси – 96–98 % и выход – 128–130 %. Установлено, что по основным свойствам экспериментальные образцы соответствуют промышленному коллоксилу «Н». При сравнении опытных целлюлоз методом ИК-Фурье спектроскопии выявлено, что спектры исследуемых образцов содержат основные функциональные группы (3700–3000, 3000–2800, 1645–1640, 1400–1300, 1200–1000, 900–500 см⁻¹), которые характерны для целлюлозы. Установлено, что ИК-спектры опытных целлюлоз по основным характеристическим частотам идентичны спектрам целлюлоз из традиционного сырья: хлопка и древесины. Методом ИК-Фурье спектроскопии выявлено, что в ИК-спектрах нитратов целлюлозы из технической целлюлозы плодовых оболочек овса и промышленной хлопковой целлюлозы содержатся полосы поглощения (2558–2556, 1662–1660, 1642–1639, 1279–1277, 825–816, 746, 680 см⁻¹), отвечающие за колебания нитрогрупп. Подтверждено, что основным полосам поглощения синтезированные образцы соответствуют промышленному коллоксилу «Н».

Ключевые слова: плодовые оболочки овса, техническая целлюлоза, нитраты целлюлозы, метод ИК-Фурье спектроскопии.

ВВЕДЕНИЕ

Целлюлоза является наиболее востребованным продуктом многоцелевого назначения и стартовой основой для получения широкого спектра новых материалов, в частности нитратов целлюлозы (НЦ). Традиционно наиболее высококачественные НЦ в производстве наиболее ответственных изделий для оборонной промышленности и гражданской продукции изготавливаются из хлопковой целлюлозы (ХЦ). Однако в последние годы качество продукции и стабильность свойств ХЦ, поставляемой в Россию из Узбекистана и Казахстана, желают оставаться лучшими. Наряду с ХЦ, используют древесную целлюлозу, производство которой сейчас приостановлено в связи с экологической вредностью, трудностью переработки и дефицитом лесных ресурсов [1].

В настоящее время актуальной проблемой является получение высококачественной целлюлозы и ее НЦ из альтернативного ежегодно возобновляемого растительного сырья взамен хлопковых и древесных целлюлоз. Одним из таких промышленно значимых ис-

точников являются отходы сельскохозяйственного производства – плодовые оболочки овса (ПОО).

ИК-Фурье спектроскопия – широко известный и апробированный метод анализа, позволяющий изучать пространственное строение полимера, наличие и характер внутри- и межмолекулярных связей, определять реакционную способность данных соединений [2], массовую долю (м. д.) азота в НЦ [3] и другие характеристики. Метод ИК-Фурье спектроскопии чувствителен к структурным изменениям веществ. Для решения большинства структурно-аналитических задач этим методом используют диапазон частот 4000–500 см⁻¹. В указанных пределах содержатся полосы поглощения, соответствующие валентным колебаниям углеродного скелета ($\nu = 3200\text{--}2700\text{ см}^{-1}$), гидроксильных групп ($\nu = 3700\text{--}3200\text{ см}^{-1}$), нитроэфирных групп ($\nu = 1660, 1280, 840\text{ см}^{-1}$), сложноэфирных групп ($\nu = 1500\text{--}1000\text{ см}^{-1}$) и т. д.

В многочисленных работах отечественных и зарубежных ученых отражены результаты сравнения хлопковой и древесной целлюлоз с целлюлозами из альтернативного

целлюлозосодержащего сырья, а также НЦ на его основе с промышленными НЦ.

Так, например, Г. Н. Марченко с соавторами сравнивали ИК-спектры поглощения хлопковой и древесной целлюлоз с ИК-спектрами из льна, рапса, мискантуса и камыша [4]. В работе И. Н. Торгун с коллегами [1] сопоставлены ИК-спектры льняной целлюлозы с хлопковой и древесной целлюлозами, а также спектры микрокристаллических льняной, хлопковой и древесной целлюлоз. З. Т. Валишиной с коллегами [5, 6] выявлено, что по структурным параметрам пеньковая целлюлоза идентична пеньковой целлюлозе зарубежного стандарта и ХЦ, кроме того в работе [5] показано, что НЦ на основе пеньковой целлюлозы характеризуется большей молекулярной однородностью в сравнении с промышленным пирооксилином № 1 на основе ХЦ. В работе Ю. М. Михайлова с коллегами [2] показана эффективность метода ИК-спектроскопии для определения структурных характеристик целлюлоз различной природы (хлопковой, древесной и льняной) и НЦ на их основе. В работе Ю. А. Гисматулиной и В. В. Будаевой [7] приведено сравнение целлюлоз, выделенных из мискантуса, листа и стебля отдельно, двумя способами: азотнокислым и комбинированным с ХЦ. Установлено, что ИК-спектры опытных целлюлоз по основным характеристическим частотам совпадают со спектром промышленной ХЦ. В последние годы в качестве перспективного источника целлюлозы и НЦ исследователями рассматривается мискантус, о чем свидетельствуют работы [8-12]. D. Trache с коллегами показана принципиальная возможность получения НЦ на основе травы эспарто [13] и выявлено, что по основным характеристическим частотам полимеры соответствуют НЦ.

Однако, несмотря на большое количество публикаций по получению целлюлозы и ее нитратов из альтернативного растительного сырья, сведения об исследовании целлюлозы из ПОО и НЦ на ее основе методом ИК-Фурье спектроскопии отсутствуют.

Целью данной работы являлось получение НЦ на основе технической целлюлозы (ТЦ) из ПОО и ХЦ, а также сравнение опытных целлюлоз и НЦ методом ИК-Фурье спектроскопии с промышленными образцами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования являлись: ТЦ, выделенная из ПОО на опытном производстве ИПХЭТ СО РАН азотнокислым способом (таблица 1), включающим в себя последова-

тельную обработку исходного сырья разбавленными растворами азотной кислоты и гидроксида натрия при атмосферном давлении и температуре около 90–95 °С [8, 14] и промышленная ХЦ (таблица 1), предоставленная с Бийского химического комбината. Образцы НЦ получали путем обработки целлюлоз серно-азотной кислотной смесью (КС), используемой в промышленности при изготовлении нитроэфиров [15] в условиях синтеза коллоксилина «Н» с м. д. воды в КС 14 % при температуре 30 °С в течение 40 мин, модуль нитрования 1:25 [9, 16, 17]. Далее образцы НЦ стабилизировали по схеме: обработка в воде в течение 1 ч при температуре 85–95 °С (требуемого уровня кислотности достигали за счет остаточного количества кислот в НЦ), высокотемпературная обработка в автоклаве в 0,3%-ном растворе азотной кислоты в течение 60–130 мин при 130 °С, обработка в 0,03%-ном растворе карбоната натрия в течение 3 ч при температуре 85–95 °С, повторная обработка в воде в течение 1 ч при температуре 85–95 °С и окончательная промывка образцов до нейтральной реакции промывных вод.

Основные физико-химические характеристики образцов НЦ были определены по стандартным методикам, действующим в отрасли, м. д. азота определяли ферросульфатным способом [3].

ИК-спектры образцов целлюлоз и НЦ регистрировали на спектрометре «Инфралюм-801» (Россия) в диапазоне частот 4000–500 см⁻¹. Для съемки спектров прессовали таблетки в соотношении НЦ:КВг = 1:150.

Работа была выполнена при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При выборе целлюлозного сырья для нитрования решающее значение имеет не только химическая чистота целлюлозного материала, т. е. содержание в нем нецеллюлозных компонентов, но и структура волокна [1]. При изготовлении коллоксилина «Н» рекомендуют использовать целлюлозы с м. д. α-целлюлозы не менее 92 % и суммарным количеством нецеллюлозных компонентов не более 1,2 % [1]. Используемый в оборонной промышленности коллоксилин «Н», должен удовлетворять следующим требованиям: м. д. азота – 11,85–12,29 %, вязкость – 8,5–15,8 мПа·с, растворимость в спиртоэфирной смеси – не менее 98 % [18, 19].

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2018

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ И ЕЕ НИТРАТОВ МЕТОДОМ ИК-ФУРЬЕ СПЕКТРОСКОПИИ

Из представленных в таблице 1 данных следует, что ТЦ, выделенная из ПОО азотнокислым способом на опытном производстве ИПХЭТ СО РАН (таблица 1), характеризуется высокой м. д. α -целлюлозы – 94 % – с одновременно высокой суммарной м. д. нецеллюлозных компонентов – 3,77 % – по сравнению с промышленной ХЦ, у которой м. д. α -

целлюлозы составляет 97 %, а суммарное количество нецеллюлозных компонентов – 0,85 %. ТЦ из ПОО, в сравнении с ХЦ, имеет высокую СП – 1390 против 1080. Смачиваемость ТЦ из ПОО на 18 г ниже, чем у ХЦ, что может быть обусловлено морфологическими особенностями исходного сырья.

Таблица 1 – Физико-химические характеристики ТЦ, выделенной из ПОО азотнокислым способом на опытном производстве ИПХЭТ СО РАН, и промышленной ХЦ

Наименование образца	Массовая доля*, %				СП	Смачиваемость, г
	α -целлюлозы	остаточного лигнина	зола	пентозанов		
ТЦ из ПОО	94,0±0,5	0,48±0,05	0,39±0,05	2,9±0,05	1390	112
ХЦ	97,0±0,5	0,20±0,05	0,15±0,05	0,5±0,05	1080	130

Примечание: * – определено по стандартным методикам [20] в пересчете на абсолютно сухое сырье; СП – степень полимеризации.

В таблице 2 приведены свойства образцов НЦ из ТЦ ПОО и ХЦ в сравнении с промышленным коллоксилином «Н».

Согласно данным, представленным в таблице 2, образцы НЦ, полученные из ТЦ ПОО и ХЦ, характеризуются близкими физи-

ко-химическими характеристиками: м. д. азота – 11,82–12,12 %, вязкость – 10–15 мПа·с, растворимость в спиртоэфирной смеси – 96–98 %, выход – 128–130 %. Установлено, что по основным показателям НЦ соответствуют промышленному коллоксилину «Н» [18, 19].

Таблица 2 – Физико-химические характеристики НЦ из ТЦ ПОО и ХЦ в сравнении промышленным коллоксилином «Н» [18, 19]

Наименование образца	Характеристики			
	м.д. азота, %	вязкость 2%-го раствора в ацетоне, мПа·с	растворимость в спиртоэфирной смеси, %	Выход, %
НЦ из ТЦ ПОО	12,12±0,05	10±1	98±2	130
НЦ из ХЦ	11,82±0,05	15±1	96±2	128
Промышленный коллоксилин «Н» [18]	11,85-12,29	8,5-15,8	не менее 98	~142

Для получения информации о молекулярной структуре образцов исходных целлюлоз и НЦ были проведены исследования с помощью ИК-Фурье спектроскопии в области частот 4000–500 см⁻¹.

На рисунке 1 приведены ИК-спектры ТЦ из ПОО (рисунок 1 а) и промышленной ХЦ (рисунок 1, б). В ИК-спектрах исследуемых образцов целлюлоз наблюдается интенсивная широкая полоса поглощения сложной формы в области валентных колебаний гидроксильных (ОН-) групп при 3600-3200 см⁻¹, включенных в водородную связь, и менее интенсивная полоса поглощения валентных колебаний –СН-, –СН₂ в области 3000-2800 см⁻¹ воды [21]. Интенсивная полоса с максимумом около 1640 см⁻¹ принадлежит деформационным колебаниям ОН-групп воды, присутствующей в целлюлозах. При увеличении содержания воды максимум не-

сколько смещается в сторону больших волновых чисел. Установлено, что область частот 1500–1400 см⁻¹ в ИК-спектрах углеводов чувствительна к изменению конформаций оксиметильной группы. Относительно четко выделяющаяся полоса около 1433 см⁻¹ связана с внутренними деформационными колебаниями СН₂ в группах СН₂ОН. В области 1400–1300 см⁻¹ в ИК-спектрах целлюлоз лежат частоты деформационных колебаний групп С–ОН, СН. Полосы поглощения около 1370-1360, 1320 см⁻¹ отнесены за счет первичных гидроксильных групп различных поворотных изомеров. Полосы поглощения в области 1200–1000 см⁻¹ обусловлены в основном валентными колебаниями С–О. Полосы в интервале частот 900-700 см⁻¹ могут быть обусловлены маятниковыми колебаниями метиленовых групп, деформационными колебаниями связей СН и пиранозных звень-

ев. Размытое поглощение с нечетко выраженной структурой в области 700-400 см⁻¹ можно отнести за счет деформационных колебаний гидроксильных групп и обертонов водородных связей [21].

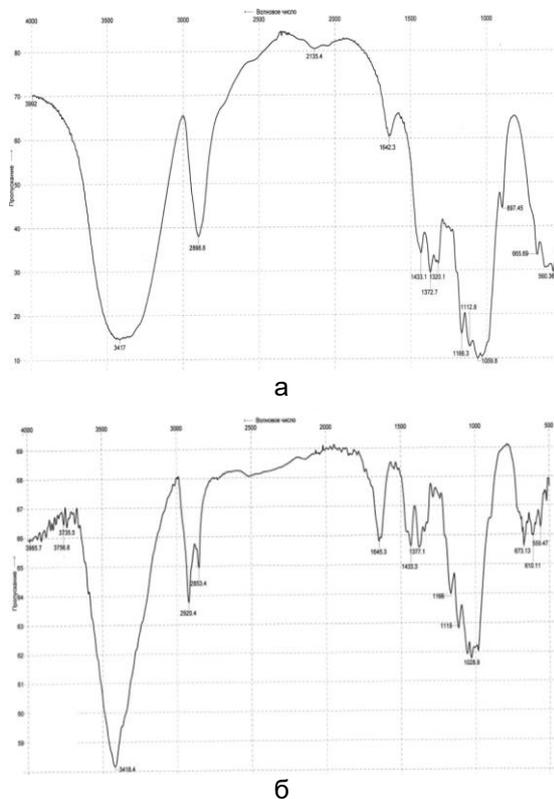


Рисунок 1 – ИК-спектры: а) ТЦ из ПОО; б) промышленной ХЦ

Таким образом, ИК-спектры образцов исследуемых целлюлоз по основным полосам поглощения идентичны спектрам образцов целлюлозы, полученных из традиционных видов сырья (хлопок и древесина) [2, 18, 21, 22.]

В таблице 3 приведено отнесение полос в ИК-спектрах НЦ из ТЦ ПОО, ХЦ и промышленного коллоксилина «Н». Во всех спектрах, синтезированных образцов НЦ зарегистрированы характеристические частоты, свидетельствующие о структурных особенностях макромолекул НЦ. Из таблицы 3 следует, что в спектрах НЦ в области 3700-3200 см⁻¹ присутствуют пики валентных колебаний $\nu(\text{OH})$ в виде широкой полосы сложного контура, что свидетельствует о неполном замещении НЦ. Они принадлежат гидроксильным группам НЦ, участвующим в образовании водородных связей, и являются характерным признаком химической неоднородности НЦ. Полоса поглощения около

2925-2922 см⁻¹ отвечает за валентные колебания CH_2 -групп. Валентные колебания нитратных групп соответствует полосе поглощения около 2558-2556 см⁻¹.

Таблица 3 – Отнесение полос в ИК-спектрах НЦ из ТЦ ПОО, ХЦ и промышленного коллоксилина «Н»

Отнесение к химическим группам	Наименование образца		
	НЦ из ТЦ ПОО	НЦ из ХЦ	Коллоксилин «Н»
Частота, см ⁻¹			
Валентные колебания $\nu(\text{OH})(\text{OH}\dots\text{OH})$	3568	3563	3468
Валентные колебания $\nu(\text{CH}_2)$	2922	2924	2925
Валентные колебания $2\nu(\text{NO}_2)$	2558	2556	2556
Валентные колебания $\nu_a(\text{NO}_2)$	1660	1662	1660
Деформационные колебания $\sigma(\text{CH}_2)$	1639	1640	1642
Деформационные колебания $\sigma(\text{COH})$	1428	1432	1436
Деформационные колебания $\sigma(\text{CH})$	1379	1379	1387
Симметричные валентности $\nu_s(\text{NO}_2)$	1277	1277	1279
Валентные колебания $\nu(\text{C-O})$	1164	1165	1166
Валентные колебания $\nu(\text{C-O})$	1072	1072	1072
Деформационные колебания $\sigma(\text{CH})$	1000	1001	1001
Валентное колебание $\nu(\text{NO}_2)$	825	823	816
Веерное колебание $\gamma_w(\text{NO}_2)$	747	746	746
Ножничное колебание $\delta(\text{NO}_2)$	681	681	680

В ИК-спектрах образцов НЦ в области 1700-1500 см⁻¹ перекрываются несколько полос. По литературным данным [22], полоса в области около 1662–1660 см⁻¹ отнесена к $\nu_a(\text{NO}_2)$ нитратных групп, связанных с CH -группами глюкопиранозных циклов НЦ (положение $\text{C}_{(2)}$ и/или $\text{C}_{(3)}$), интенсивная полоса в области 1642-1639 см⁻¹ отвечает за колебания $\nu_a(\text{NO}_2)$ нитратных групп, связанных с CH_2 -группами глюкопиранозных циклов НЦ (положение $\text{C}_{(6)}$). Это хорошо согласуется с данными по отнесению полосы $\nu_a(\text{NO}_2)$

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ И ЕЕ НИТРАТОВ МЕТОДОМ ИК-ФУРЬЕ СПЕКТРОСКОПИИ

нитратов первичных и вторичных спиртов. Известно, что замещение Н- группы на NO₂- преимущественно происходит в положении C₍₆₎ и в неравной степени в положениях C₍₂₎ и C₍₃₎ в зависимости от степени этерификации.

Полоса поглощения при 1436-1428 см⁻¹ относится к ножничному колебанию CH₂- групп. В ИК-спектрах образцов НЦ в области 1200–1500 см⁻¹ имеются полосы поглощения около 1387–1379 см⁻¹ и 1279–1277 см⁻¹, интенсивность которых заметно снижается при уменьшении м.д. азота [21]. Полоса при 1387–1379 см⁻¹ может быть отнесена к деформационным колебаниям СН-групп, а интенсивная полоса поглощения при 1279–1277 см⁻¹ соответствует симметричными валентными колебаниями групп NO₂. Полоса поглощения при 1166–1164 см⁻¹ характеризуется валентными колебаниями гликозидной связи. Полоса поглощения около 1072 см⁻¹ обусловлена валентными колебаниями связей С-О, соединяющих пиранозные циклы, а полоса при 1000 см⁻¹ обусловлена деформационными колебаниями СН-групп. В спектрах образцов НЦ проявляется ряд полос, обусловленных поглощением нитратных групп, около 825–816, 746 и 680 см⁻¹. Эти полосы относятся соответственно к валентным колебаниям N-O, внеплоскостным маятниковым колебаниям NO₂ и к плоскостным деформационным колебаниям NO₂ [2, 21, 22]. В ИК-спектре НЦ из ТЦ ПОО наблюдается незначительные смещения характеристических частот в длинноволновую область, в сравнении со спектром промышленного НЦ, что может быть обусловлено ослаблением межмолекулярных связей. Сравнение полученных ИК-спектров образцов НЦ из ТЦ ПОО и ХЦ, со спектром промышленного коллоксилина «Н» свидетельствует о структурном сходстве данных полимеров [25, 26].

ВЫВОДЫ

В результате обработки ТЦ из ПОО и промышленной ХЦ серно-азотной КС с м.д. воды 14 % получены образцы НЦ с близкими физико-химическими характеристиками: м.д. азота – 11,82–12,12 %, вязкость – 10–15 мПа·с, растворимость в спиртоэфирной смеси – 96–98 %, выход – 128–130 %. Установлено, что по основным показателям синтезированные НЦ соответствуют промышленному коллоксилину «Н». При сравнении ТЦ из ПОО и промышленной ХЦ методом ИК-Фурье спектроскопии выявлено, что в спектрах исследуемых образцов содержатся основные функциональные группы (3700–3000, 3000–2800, 1645–1640, 1400–1300, 1200–1000, 900–500 см⁻¹), характерные для целлюлозы. Установлено, что ИК-спектры опытных целлюлоз

по основным характеристическим частотам идентичны спектрам целлюлоз из хлопка и древесины. Методом ИК-Фурье спектроскопии выявлено, что НЦ на основе ТЦ из ПОО и ХЦ содержат полосы поглощения (2558–2556, 1662–1660, 1642–1639, 1279–1277, 825–816, 746, 680 см⁻¹), отвечающие за колебания нитрогрупп и позволяющие идентифицировать полученные продукты как азотнокислые эфиры целлюлозы. Также установлено, что основным полосам поглощения образцы НЦ соответствуют промышленному коллоксилину «Н».

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований президиума РАН № 56 «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности» (проект № 0385-2018-0015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лен в пороховой промышленности. Научное издание, доп. и перер. / под. ред. С. И. Григорова. – М. : ФГУП «ЦНИИХМ», 2015. – 348 с.
2. Спектральное исследование целлюлозы и нитратов целлюлозы / Ю. М. Михайлов, Н. А. Романько, Р. Ф. Гатина [и др.] // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. – 2010. – № 1. – С. 52–62.
3. Геньш, К. В. Количественный анализ нитратов целлюлозы методом ИК-Фурье-спектроскопии / К. В. Геньш, П. В. Колосов, Н. Г. Базарнова // Химия растительного сырья. – 2010. – № 1. – С. 63–66.
4. Марченко, Г. Н. Структурно-химические свойства целлюлозы и ее аналогов. Новые источники сырья, методы их переработки / Г. Н. Марченко, О. К. Нугманов, Р. И. Шакиров, Р. Я. Дербердеев. – Казань : «Печать-Сервис XXI век», 2017. – 293 с.
5. Валишина, З. Т. Исследование структуры целлюлозы из пенькового волокна и нитрата целлюлозы на ее основе / З. Т. Валишина, Г. Н. Галиуллина, Е. С. Петров, Н. И. Наумкина, А. В. Косточко // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 13. – С. 149–152.
6. Исследование свойств азотнокислых эфиров целлюлозы на основе пеньковой целлюлозы / З. Т. Валишина, А. В. Иванова, Б. Ф. Мухаметшин, А. А. Александров, А. В. Косточко // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 18. – С. 65–68.
7. Гисматулина, Ю. А. Сравнение целлюлоз, выделенных из мискантуса, с хлопковой целлюлозой методом ИК-Фурье спектроскопии / Ю. А. Гисматулина, В. В. Будаева // Ползуновский вестник. – 2014. – № 3. – С. 177–181.
8. Gismatulina, Yu. A. Nitrocellulose Synthesis from Miscanthus Cellulose / Yu. A. Gismatulina, V. V. Budaeva, G. V. Sakovich // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2018. – Vol. 43. – P. 96–100.

9. Корчагина, А. А. Оптимальные условия синтеза коллоксилина «Н» из мискантуса / А. А. Корчагина, Ю. А. Гисматулина, А. А. Кухленко // Ползуновский вестник. – 2017. – № 3. – С. 107–114.
10. Нугманов, О. К. Структурный анализ травяной целлюлозы / О. К. Нугманов, Н. П. Григорьева, Н. А. Лебедев // Химия растительного сырья. – 2013. – № 1. – С. 29–37.
11. Шипина, О. Т. ИК-спектроскопические исследования целлюлозы из травянистых растений / О. Т. Шипина, М. Р. Гараева, А. А. Александров // Вестник Казанского технологического университета. – 2009. – № 6. – С. 148–152.
12. Денисова, М. Н. Исследование структур мискантуса, гидротропной целлюлозы и нитратов, полученных из нее / М. Н. Денисова, А. Г. Огиенко, В. В. Будаева // Химия растительного сырья. – 2012. – № 4. – С. 19–27.
13. Physicochemical properties of microcrystalline nitrocellulose from alfa grass fibres and its thermal stability / D. Trache, K. Khimeche, A. Mezroua, M. Benziane // Therm Anal Calorim. – 2016. – Vol. 124 (3). – P. 1485–1496.
14. Gismatulina, Yu. A. Cellulose nitrates from intermediate flax straw / Yu. A. Gismatulina, V. V. Budaeva, G. V. Sakovich // Russian Chemical Bulletin. – 2016. – Vol. 65, No. 12. – P. 2920–2924.
15. Питеркин, Р. Н. Технология нитроэфиров и нитроэфирсодержащих промышленных взрывчатых веществ / Р. Н. Питеркин, Р. Ш. Просвирнин, Е. А. Петров // Монография. – Бийск: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2012. – 268 с.
16. Корчагина, А. А. К вопросу технологии нитрования целлюлозы из альтернативного сырья / А. А. Корчагина // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 2. – С. 62–68.
17. Якушева, А. А. Нитраты целлюлозы из нового источника целлюлозы – плодовых оболочек овса / А. А. Якушева // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8. – Ч. 2. – С. 360–364.
18. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ / Ч. II; под ред. В. А. Столяровой. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 916 с.
19. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / Под ред. Б. П. Жукова. Изд. 2-е, исправл. – М.: «Янус-К», 2000. – 296 с.
20. Оболенская, А. В. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы / А. В. Оболенская, З. П. Ельницкая, А. А. Леонович. – М.: Экология, 1991. – 320 с.
21. Жбанков, Р. Г. Инфракрасные спектры и структура углеводов / Р. Г. Жбанков. – Минск: Наука и техника, 1972. – 456 с.
22. Коваленко, В. И. Структурно-кинетические особенности получения и термодеструкции нитратов целлюлозы / В. И. Коваленко, Г. М. Сопин, Г. М. Храпковский / Ин-т орган. и физ. химии им. А.Е. Арбузова. – Минск. Наука, 2005. – 213 с.

Корчагина Анна Александровна, к.т.н, младший научный сотрудник лаборатории биоконверсии, ФГБУН «Институт проблем химико-энергетических технологий» Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), e-mail: Yakusheva89_21.ru@mail.ru, тел.: (3854) 30-59-85.

Будаева Вера Владимировна, к.х.н., доцент, заведующая лабораторией биоконверсии, ФГБУН «Институт проблем химико-энергетических технологий» Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), e-mail: budaeva@ipcet.ru, тел.: (3854) 30-59-85.