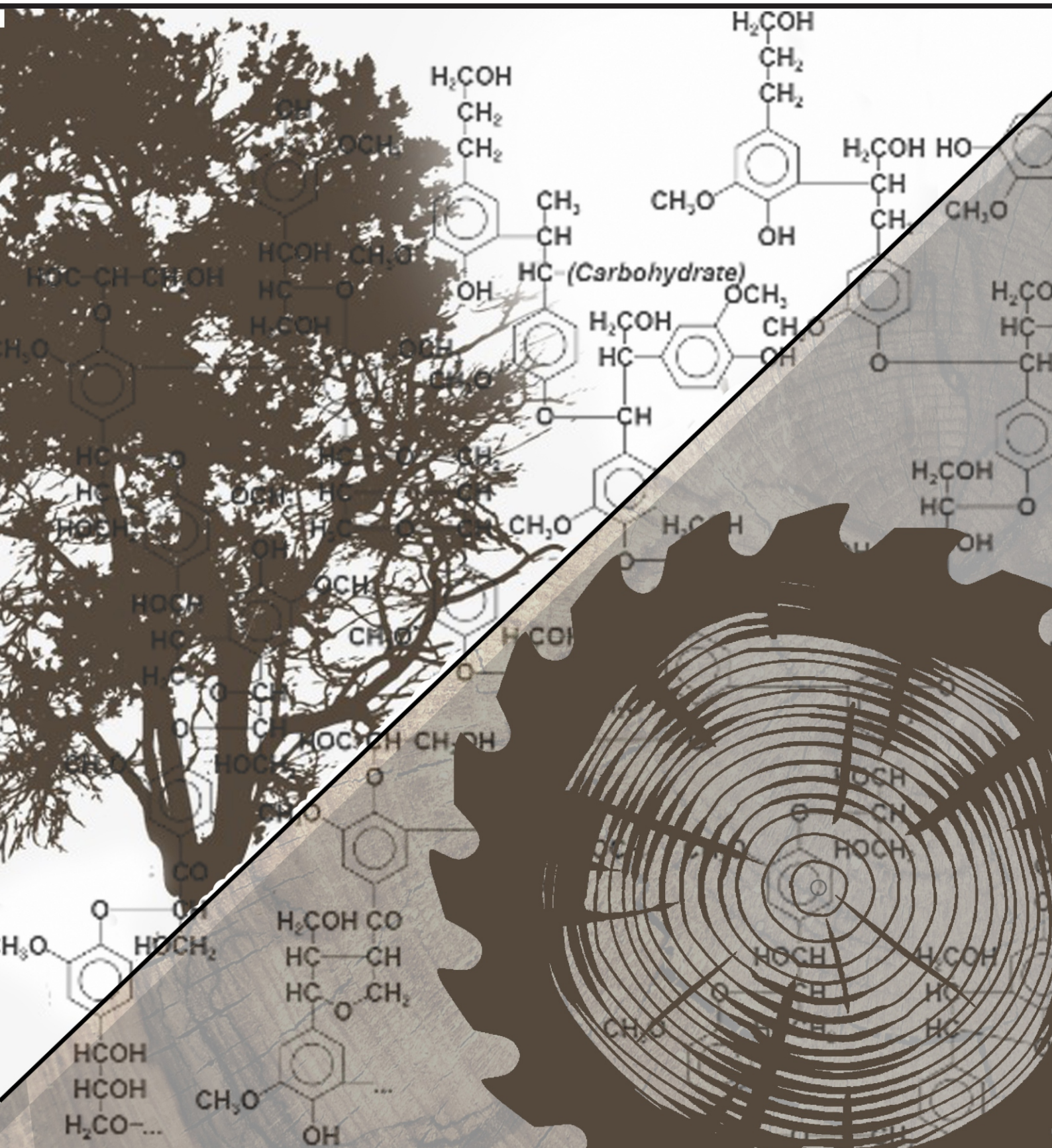


ISSN 0011-9008



ДЕРЕВО —

ISSN 0011-9008

обрабатывающая 2/2018 промышленность

Учредитель: Редакция журнала
«Деревообрабатывающая промышленность»
Основан в апреле 1952 г.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группе научных специальностей 05.21.00 – Технология, машины и оборудование лесозаготовок, лесного хозяйства, деревопереработки и химической переработки биомассы дерева.

Редакционная коллегия:



Главный редактор
Сафин Руслан Рушанович
д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет»



Зам. главного редактора
Разумов Евгений Юрьевич
д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет»

Торопов Александр Степанович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический
университет»

Царев Евгений Михайлович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический
университет»

Черных Михаил Михайлович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет
им. Калашникова»



Зам. главного редактора
ответственный за
международную ред. коллегию
Štefan Barčík, Prof. ing., Ph.D.

Technical university in Zvolen,
Faculty of environmental and
manufacturing technology,
Slovakia

Сафин Рушан Гареевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

Баширов Владимир Николаевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

Гаспарян Гарик Давидович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет»

Григорьев Игорь Владиславович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная
академия»

Мазуркин Петр Матвеевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический
университет»

Романов Евгений Михайлович, д.с.-х.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический
университет»

Рыкунин Станислав Николаевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана»

Семенов Юрий Павлович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана»

Dr. prof. Vlado Goglia
University of Zagreb, Croatia

Dr. prof. Ruzica Beljo Lucic
University of Zagreb, Croatia

Dr. prof. Nencho Delijski
University of Forestry, Bulgaria

Dr. prof. Ladislav Dzurenda
Technical University, Slovakia

Dr. prof. Etele Csanady
University of West Hungary

Dr. prof. Alfred Teischinger
BOKU University of Natural Resources and Applied Life Sciences,
Austria

Marian Babiak, PhD, Dr.h.c.prof.RNDr.
Czech University of Life Sciences Prague,
Czech Republic

Адрес редакции:
117303, Москва, ул. Малая
Юшуньская, д. 1, корп. 1,

© «Редакция журнала
«Деревообрабатывающая
промышленность», 2018

journal_woodworking@mail.ru
www.dop1952.ru

Свидетельство о регистрации
СМИ в Роскомпечати № 014990
Формат бумаги 60x88/8
Тираж 720 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Лесоинженерное дело

Заикин А.Н., Меркелов В.М., Малышева Н.П.

Возможные варианты комплектов машин и мобильного оборудования для переработки древесины, загрязненной радионуклидами

3

Физико-механические процессы в деревообработке

Глотова Т.И.

Совершенствование технологической подготовки производства пиломатериалов при круговом способе раскря бревен

10

Гайнуллин Р.Х., Гайнуллин Р.Х., Чемоданов А.Н., Царев Е.М., Анисимов С.Е.

Моделирование силовых характеристик процесса строгания древесины на шпон вращающимся механизмом резания

15

Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б.

Влияние седиментации частиц матовой добавки в растворах мебельных лаков на степень матовости поверхностей прозрачных покрытий

21

Химическая технология древесины

Zoltán Kocsis, Etele Csanády

Study on the necessary channel length of pellet making machines

29

Тимербаев Н.Ф., Гильфанов К.Х., Гогелашивили Г.Ш., Таланцев В.И.

Влияние способа сушки на структуру и гидрофильные свойства небеленой сульфатной целлюлозы марки ЭК-1

34

Просвирников Д.Б., Закиров С.Р., Гильфанов К.Х., Таймаров М.А

Полнорационный комбикорм на основе древесных и растительных отходов и технология его приготовления

39

Тимербаев Н.Ф., Таймаров М.А., Грунин Ю.Б., Масас Д.С.

Анализ гидрофильных и бумагообразующих свойств древесной целлюлозы методом протонной магнитной релаксации

47

Разумов Е.Ю., Сафин Р.Р., Саерова К.В., Губернаторов В.В., Губернаторова А.Е.

Влияние условий произрастания на качественные показатели чаги

51

Е.М. Кашин, В.Н. Диденко

Балансово-концентрационный метод определения состава и выхода древесного генераторного газа. Концентрационная часть

57

Илалова Г.Ф., Гизатова М.В., Гиматдинова А.Р., Тунцев Д.В., Илалова А.Ф.

Влияние предварительной термической обработки на термокондуктивный пиролиз осины

68

Лесоинженерное дело

УДК 674.093:630

ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ КОМПЛЕКТОВ МАШИН И МОБИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ РАДИОНУКЛИДАМИ

А.Н. Заикин, В.М. Меркелов, Н.П. Малышева

В результате техногенных аварий, в том числе на Чернобыльской АЭС, значительная часть лесных массивов страны подверглась радиоактивному загрязнению. Брянская область вследствие аварии на Чернобыльской АЭС отнесена к районам с высокой степенью экологической напряженности, что в первую очередь обусловлено радиационным загрязнением ее территории. Использование древесины из таких регионов является весьма актуальной задачей, так как позволяет решить также экологические проблемы данных регионов за счет снижения вероятности повторного заражения радионуклидами прилегающих территорий. Решение данной проблемы предлагается на основе технологии, основанной на применении комплектов мобильных машин и оборудования, работающих непосредственно на лесосеке от бензиновых или дизельных двигателей, а также путем отбора мощностей через карданный вал. Организация их работы возможна по ранее предложенным нами схемам технологического процесса производства шпал и пиломатериалов из круглых лесоматериалов, пораженных радионуклидами, непосредственно на лесосеке. Производство пиломатериалов, из полученных в результате раскряжевки сортиментов, предлагается к реализации по схеме, предложенной авторами и защищенной патентами РФ № 2350460, №2247022. Для подтверждения эффективности предложенного варианта переработки древесины, загрязненной радионуклидами, нами произведен сравнительный расчет затрат на производство обрезного пиломатериала на мобильных установках и на стационарном оборудовании. Анализ полученных данных показывает, что с увеличением расстояния вывозки прямо пропорционально растут транспортные расходы, причем расходы по перевозке пиломатериалов значительно ниже по сравнению с расходами на перевозку деловой древесины примерно в 2 раза. Приведенные экономические расчеты показывают, что применение мобильных установок для переработки древесины на лесосеке является эффективным и вправе претендовать на реализацию.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, окорка, продольный раскрой, комплект машин, пиломатериалы.

As a result of technogenic accidents, including that at the Chernobyl Nuclear Power Plant, a significant part of country's forests has been exposed to radioactive contamination. The accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant resulted in attributing Bryansk region to the areas with high degree of environmental tension, which is primarily due to the radiation pollution of its territory. The use of wood from such regions is a very urgent task, as it also allows solving the environmental problems of these regions by reducing the likelihood of repeated radionuclide contamination of adjacent territories. The solution of this problem is proposed on the basis of a technology based on the application of sets of mobile machines and equipment operating directly on the cutting area from gasoline or diesel engines, as well as by power take-off through a propeller shaft. The organization of their work is possible according to previously proposed schemes of technological process of production of sleepers and sawn timber from round timber affected by radionuclides directly on the cutting area. Lumber production, resulting from the bucking-to-length method, it is proposed to implement the scheme proposed by the authors and protected by patents RF № 2350460, №2247022. To confirm the effectiveness of the proposed variant of processing wood contaminated by radionuclides, we made a comparative cost calculation for the production of edge-surfaced lumber on the mobile units and on the stationary equipment. The analysis of the obtained data shows with the increase in the distance of transportation, transportation costs grow directly proportional to it, and the transportation costs for sawn timber are significantly (about two times) lower in comparison with the industrial wood. The given economic calculations show that application of mobile installations for wood processing on a felling site is quite an effective method and is worth putting into practice.

Key words: radioactive pollution, debarking, longitudinal cutting, set of machines, sawn timber.

Введение

В результате аварии на Чернобыльской АЭС радиоактивному загрязнению подвергся лесной фонд РФ и других стран на площади более 3,5 млн. га (Сидоров, Пророков, 1996) [1, 7, 8, 15, 26, 27, 29]. Территория только брянских лесов, подвергшихся радиоактивному загрязнению, составила более 310 тыс. га, в то время как весь лесной фонд области составляет 1,2 млн. га, это около 25 % от всех лесных угодий региона. В зонах наибольшего радиоактивного загрязнения скопилось 2,84 млн. м³ древесины. Радиоактивное загрязнение лесных экосистем создало такие условия, при которых в течение многих лет невозможно обычное многоцелевое использование леса [25]. Леса, подвергшиеся радиационному воздействию от выбросов ЧАЭС, представляют серьезную экологическую опасность в связи с возможностью переноса радиоактивного загрязнения на незагрязненные зоны [28], а также возникновения пожаров, как от воздействия человека, так и вследствие естественных причин [8, 23, 24, 25]. Преодоление последствий аварии на Чернобыльской АЭС на загрязненных территориях невозможно без использования стимулирующих мер, направленных на защиту окружающей среды путем внедрения ресурсосберегающих, малоотходных и безотходных технологий, модернизации производства, воспроизводства природных ресурсов, увеличения доли использования вторичных ресурсов и утилизации отходов.

Проведенные ранее исследования [5, 18, 19] показали, что древесина, заготовленная в лесных массивах первой зоны загрязнения радионуклидами, может быть использована в промышленных целях после окорки. Древесина из лесных массивов второй и последующих зон загрязнения может использоваться в промышленных целях при условии полной очистки бревен от коры и снятия наиболее загрязненного внешнего слоя.

В связи с появлением в нашей стране мобильных лесопильных установок, стало возможным производство пиломатериалов на лесосеке [2, 20].

В современных условиях для предприятий лесной отрасли одной из актуальных проблем является проблема снижения себестоимости продукции. Рост цен на энергоресурсы, машины и оборудование, значительно превышающий рост стоимости товарной продукции лесопро-

мышленных предприятий снижает эффективность производства. Разнообразие предлагаемых лесозаготовительных технологий и систем машин позволяет подбирать их в соответствии с природно-производственными условиями лесозаготовок [13].

На данный момент существует множество лесозаготовительных машин, которые позволяют получать в основном потоке круглый лесоматериал и пиломатериал.

Вопрос получения окоренных сортиментов и пиломатериалов непосредственно на лесосеке рассматривался многими исследователями [2, 3, 11, 12, 14, 21]. В рамках данных исследований сделана попытка анализа эффективности применения различных технологических процессов с получением пиломатериалов мобильным деревообрабатывающим оборудованием непосредственно на лесосеках, подвергшихся радиоактивному загрязнению

Описание данных

При обработке древесины, загрязненной радионуклидами, необходимо выполнять целый ряд технологических операций – окорку, распиловку, переработку отходов от распиловки и раскряжевки. Предпочтение следует отдавать мобильным установкам (рис. 1, 2).

Нами предлагается технологическая схема процесса производства шпал из круглых лесоматериалов, пораженных радионуклидами. По этой схеме раскряжевка лесоматериалов, пораженных радионуклидами, осуществляется в соответствии с предлагаемой нами схемой [6]. Продольный раскрой сортиментов, полученных в результате раскряжевки, на пилопродукцию осуществляется по схеме, предложенной авторами и защищенной патентом РФ № 2350460, №2247022 [15, 16].

Предлагаемая нами технология и варианты комплектов машин позволяет с минимальными потерями заготовить и отгрузить потребителю «чистую» древесину в виде окоренного сырья или готовых пиломатериалов.

Наиболее предпочтительными методами утилизации образующихся при этом радиоактивных отходов древесины представляется их измельчение непосредственно на лесосеке и захоронение в специально подготовленные траншеи, либо равномерное распределение по окружающей территории [6]. Перспективными представляются также термические методы

утилизации (газификация) с помощью газогенератора для переработки древесных радиоактивных отходов [4], которые позволяет уменьшить возможность загрязнения генераторного газа

радиоактивными веществами при переработке древесины в районах, загрязненных радионуклидами.

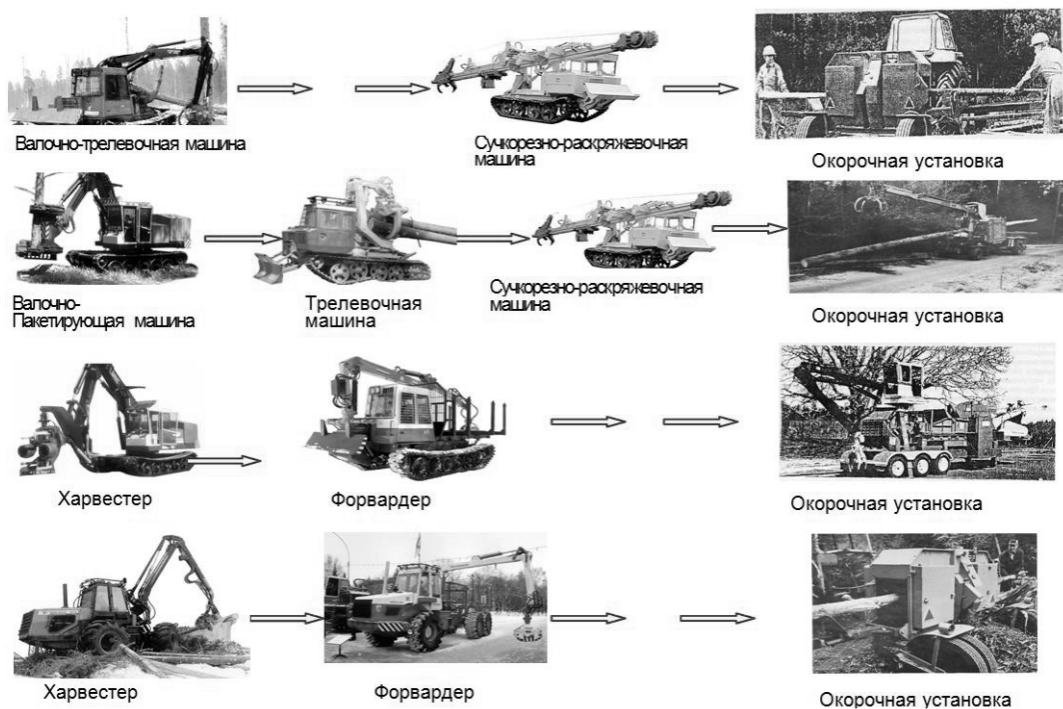


Рис. 1. Возможные варианты компоновки технологических машин и оборудования для получения окоренных сортиментов на лесосеке



Рис. 2. Возможные варианты компоновки технологических машин и оборудования для получения пиломатериалов на лесосеке

Для подтверждения эффективности предложенного варианта переработки древесины, загрязненной радионуклидами, нами произведен расчет затрат на производства обрезного пиломатериала по двум вариантам:

- производство обрезного пиломатериала на мобильных установках (ленточнопильный станок «Тайга» с бензиновым двигателем и круглопильный станок ДП-1200);

- производство обрезного пиломатериала на стационарном оборудовании (горизонтальный ленточнопильный станок «Авангард» и круглопильный станок «Барс-1А»).

Особенностью расчета выхода пиломатериала из древесины, загрязненной радионуклидами, является необходимость дополнительно срезать верхний слой загрязненной древесины. Поэтому, если стандартный выход обрезного пиломатериала составляет 64%, то у радиоактивно загрязненной древесины при дополнительном снятии наружного слоя в 1см выход составит 61%, при снятии 2 см – 54%, а при снятии 3см – 44%. Таким образом, при распиловке 1000 м³ древесины, загрязненной радионуклидами, может получиться 540 м³ обрез-

ного пиломатериала, 290 м³ кусковых отходов и 60 м³ опилок.

Для сопоставимости данных, нами выбрано оборудование с одинаковой производительностью. Так, производительность мобильных установок по обрезному пиломатериалу составляет 7-10 м³ в смену, а производительность ленточнопильного станка «Авангард» – 7 м³ обрезного пиломатериала в смену, т.е. трудозатраты для производства 540 м³ и в первом и во втором варианте составят 616 часов. На данных установках в смену работает 3 человека, поэтому при часовой тарифной ставке 125 рублей затраты на оплату труда составят 231 тыс. рублей. При этом затраты на электроэнергию по установке ДП-1200 будут равны 46,92 тыс. рублей и затраты на бензин для ленточнопильного станка «Тайга» – 45,21 тыс. рублей, а затраты на электроэнергию по стационарному оборудованию – 60,54 тыс. руб.

Полученные результаты

Результаты расчета расходов на содержание и ремонт оборудования представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Расчет затрат на содержание и ремонт оборудования

Вариант	Стоимость оборудования, тыс. руб.	Амортизация, тыс. руб.	Расходы на содержание и ремонт оборудования, тыс. руб.	Итого годовые затраты, тыс. руб.	Затраты на 540 м ³ обрезного пиломатериала, тыс. руб.
1 Мобильные установки:					
1.1 Ленточнопильный станок «Тайга»	154,00	30,8	170,8	341,6	99,63
1.2 Круглопильный станок ДП-1200	700,00	140,0			
2 Стационарное оборудование:					
2.1 Ленточнопильный станок «Авангард»	270	54	454	908	264,83
2.2 Круглопильный станок «Барс-1А»	2000,0	400			

При средней стоимости 1м³ деловой древесины 1000 рублей затраты на сырье равны 1000 тыс. руб., стоимость возвратных отходов не вычитается, т.к. они не могут использоваться в связи с тем, что являются загрязненными радионуклидами.

Для перевозки лесоматериалов (пиломатериалов и сортиментов) могут использоваться автомобили КАМАЗ-65117 и МАЗ-6303А5-320 и др. Переменные затраты на 1 км пробега у КАМАЗ-65117 с двигателем Cummins 6ISBe300 составляют 272,82 руб., а постоянные затраты – 215,5 руб. за час.

При расчете транспортных расходов необходимо учитывать загрузку машин, объем перевозимого материала и расстояние между участком по заготовке леса и деревообрабатывающим предприятием. В первом варианте на предприятие будет вывозиться обрезной пиломатериал в количестве 540 м³, поэтому при загрузке 35 м³ в машину потребуется 16 рейсов. Во втором варианте для перевозки 1000 м³ деловой древесины при загрузке 28 м³ деловой древесины в КАМАЗ необходимо 36 рейсов. В таблицах 2 и 3 приведены транспортные расходы по перевозке пиломатериала и деловой древесины.

Таблица 2 - Транспортные расходы по перевозке пиломатериала (16 рейсов)

Параметры	Расстояние, км.					
	10	20	30	40	50	60
Переменные затраты, руб.	87302	174605	261907	349210	436512	523814
Постоянные затраты, руб.	3449	6898	10347	13796	17246	20695
Время 1 рейса, ч.	1	2	3	4	5	6
Полная себестоимость, руб.	90751	181503	272254	363006	453758	544509

Таблица 3 - Транспортные расходы по перевозке деловой древесины (36 рейсов)

Параметры	Расстояние, км.					
	10	20	30	40	50	60
Переменные затраты, руб.	196430	392861	589291	785721	982152	1178582
Постоянные затраты, руб.	7761	15521	23282	31042	38803	46563
Время 1 рейса, ч.	1	2	3	4	5	6
Полная себестоимость, руб.	204191	408382	612573	816763	1020955	1225145

Для расчета себестоимости обрезного пиломатериала допустим, что расстояние между участком по заготовке леса и деревообработы-

вающим предприятием составляет 20 км. Калькуляция затрат по производству 540 м³ обрезного пиломатериала приведена в таблице 4.

Таблица 4 - Калькуляция затрат по производству 540 м³ пиломатериала, тыс. руб.

Статьи затрат	Мобильные установки	Стационарное оборудование
Сырье,	1000	1408,38
в т. ч. транспортные расходы на доставку сырья	-	408,38
Зарплата основных рабочих	231	231
Начисления на зарплату	72,53	72,53
Затраты на энергию и технологические цели	92,13	60,54
Расходы на содержание и ремонт оборудования	99,63	264,83
Цеховые расходы	231	231
Итого цеховая себестоимость	1726,29	2268,28
Транспортные расходы	181,5	-
Общехозяйственные расходы	165,31	165,31
Итого производственная себестоимость	2073,11	2433,59
Производственная себестоимость 1 м ³	3,839	4,507

На основании данных таблиц 2 и 3 построен график зависимости транспортных расходов по перевозке пиломатериалов и деловой древесины (рис. 3).

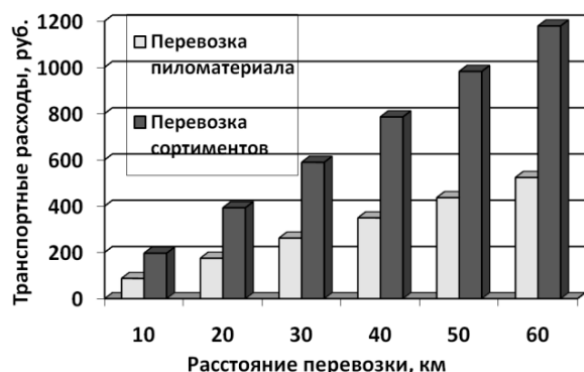


Рис. 3. Зависимость транспортных расходов от расстояния перевозки

Заключение

Анализ таблиц 2, 3 и рисунка 2 показывает, что с увеличением расстояния вывозки прямо пропорционально растут транспортные расходы, причем расходы по перевозке пиломатериалов значительно ниже по сравнению с расходами на перевозку сортиментов примерно в 2 раза.

Из таблицы 4 видно, что при производстве 540 м³ обрезного пиломатериала на мобильных установках экономия затрат составит 360,48 тыс. руб. Снижение затрат происходит за счет таких статей, как транспортные расходы и расходы на содержание и эксплуатацию оборудования, при этом на 668 руб. уменьшается себестоимость 1 м³ обрезного пиломатериала. Это повысит конкурентоспособность выпускаемой продукции и увеличит прибыль деревообраба-

тывающих предприятий. Приведенные экономические расчеты показывают, что применение мобильных установок для переработки древесины является эффективным и вправе претендовать на реализацию.

Литература

1. Борзенков Ю. А., Шубина О. А., Спиридонов С.И., Фесенко С.В. Прогнозирование распределения ^{137}Cs по компонентам древесного яруса леса при различных источниках радиоактивного загрязнения // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2005. Вып. 63. С. 457–458.
2. Вместо бревен везут из леса доски // Лесная газета. – 1992. 15 окт. С.2.
3. Якимович С.Б., Ефимов Ю.В. Возможности снижения удельной энергоемкости при производстве пиломатериалов на лесосеке. // Журнал Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 22. 2009. С. 227–228. Научная электронная библиотека «Киберленинка». Электронный ресурс. Режим обращения – <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-snizheniya-udelnoy-energoemkosti-pri-proizvodstve-pilomaterialov-na-lesoseke>.
4. Колчанов Г.Г., Наганов А.В., Савушкин И.А., Дубровский В.Д. Газогенератор для переработки древесных радиоактивных отходов: пат. 2073926 РФ, МПК G 21 F 9/32 // Изобретения. Полезные модели. 1997. № 6.
5. Заикин А.Н., Меркелов В.М. Технология и оборудование заготовки и переработки древесины, загрязненной радионуклидами. Брянск: БГИТА, 2012. 266 с.
6. Заикин А.Н., Меркелов В.М. Технология использования древесины с территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: сб. докл. IV Междунар. науч. эколог.конф. Краснодар: Кубанский госагроуниверситет, 2015. Ч. II. С. 573–575.
7. Использование древесины в строительном комплексе в зависимости от условий произрастания на радиоактивно-загрязненных территориях. Машенко Т. В. дис. на соиск. уч. степ.канд. с/х наук, Брянск. – 1999. Электронный ресурс. Режим доступа – <http://earthpapers.net/ispolzovanie-drevesiny-v-stroitelnom-komplekse-v-zavisimosti-ot-usloviy-proizrastaniya-na-radioaktivno-zagryaznennyh-terr>.
8. Котов А.С. Радиационная ситуация в лесах Брянской области// Безопасность окружающей среды. 2008. № 2. С.68–72.
9. Кузнецов А.В., Москвиллин Е.А., Федоткин Д.В., Зверева-Степная А.В. Экологические последствия лесных пожаров на радиоактивно загрязненной местности. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-posledstviya-lesnyh-pozharov-na-radioaktivno-zagryaz...>
10. Меркелов В.М., Макеева А.А. Мобильные установки для переработки древесины, загрязненной радионуклидами // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Кострома: КГТУ, 2013. С. 132–134.
11. Платонов Е.И. Обоснование режимов работы технологических линий для производства круглых лесоматериалов на лесосеке в условиях радиационного заражения. // Вклад ученых и специалистов в национальную экономику. Материалы научно-технической конференции (15–19 мая 2000 г.), т.2. Посвящается 70-летию Брянской государственной инженерно-технологической академии, Брянск. 2000. С. 41–43.
12. Обоснование ресурсосберегающих технологий лесопромышленного комплекса, адаптированных к природным условиям Пермского края, с минимизацией затрат на лесовосстановление: отчет о НИР (промежуточный) / Марийский государственный технический университет; рук. Якимович С.Б. – Гос. контракт № 01.29/07 с министерством промышленности и природных ресурсов Пермского края - Йошкар-Ола, 2007 г., 500 с.
13. Мохирев А.П., Горяева Е.В., Медведев С.О. Оценка технологических процессов лесозаготовительных предприятий. // Лесотехнический журнал №4. 2016. С.139–147. DOI:УДК 630*32: 330.332.21.
14. Повышение эффективности технологии переработки ствольной древесины с учетом производства радиальных пиломатериалов на лесосеке. Дис. и автореф. по ВАК 05.21.01, канд. техн наук Сухих А. Н. Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-tekhnologii-pererabotki-stvolovoi-drevesiny-s-uchetom-proizvodstva-#ixzz56X16pCbX> 08.02.2018.
15. Руководство по ведению лесного хозяйства в зонах радиоактивного загрязнения от аварии на Чернобыльской АЭС (на период 1997–2000 гг.). Режим доступа: <https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2F>

www.forestforum.ru/%2Finfo/%2Fflaws/%2Fmanagement/%2Fradiation.doc&name=radiation.

16. Способ раскря круглых лесоматериалов, пораженных радионуклидами: пат. 2350460 РФ, МПК В 27 В 1/00 / Торопов А.С., Торопов С.А., Меркелов В.М., Микрюкова Е.В., Шакирова А.И.; заявитель и патентообладатель Мар. ГТУ. № 2007117657/03; заявл. 11.05.07; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9.

17. Способ раскря круглых лесоматериалов, пораженных радионуклидами: пат. 2247022 РФ, МПК В 27 В 1/00 / Торопов А.С., Меркелов В.М., Жидова Е.В., Краснова В.Ф.; заявитель и патентообладатель Мар. ГТУ. № 2007117657/03; заявл. 11.05.07; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9.

18. Торопов А.С., Заикин А.Н., Меркелов В.М. Особенности переработки древесины, загрязненной радионуклидами // Лесн. журн. 2017. № 1. С. 59-65. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.119

19. Торопов А.С., Меркелов В.М., Краснова В.Ф. Принципы моделирования раскря древесины, загрязненной радионуклидами // Вестн. Красн. ГАУ. 2011. № 5. С. 7–11.

20. Эффективное производство пиломатериалов в лесу // ЛесПромИнформ. 2007. №7. С. 36-39.

21. Якимович, С.Б. Оптимизация раскря на сортименты и пиломатериалы в условиях лесосеки / С.Б. Якимович, Ю.В. Ефимов // Лесной вестник. 2008. №6. С. 125-129.

22. Belarus – Forestry Sector Development Project: environmental assessment of radiological consequences for forestry in contaminated areas of the Republic of Belarus (Vol. 5). Final report: fire management mission. (1994). World Development

Sources, WDS 1997-2. Belarus: Government of Belarus. Available at:

<http://documents.worldbank.org/curated/en/571081468206692053/Final-report-fire-management-mission>.

23. Dusha-Gudym, S. I. (1993). Forest Fires on radionuclide contaminated territories. Guarding and protection of forest, mechanization, using of forest. *Revue Information*, 9, 1–50.

24. McCabe, L. C. (1952). Wood-Burning Incinerators ATMOSPHERIC POLLUTION. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44 (4), 111A–114A. doi:10.1021/ie50508a008

25. Panfilov A.V., Uspenskaya E.Ju. Rehabilitation of Radioactive Contaminated Forests. IAEA-TECDOC-1280. Radiation Legacy of the 20th Century: Environmental Restoration. Vienna, 2002, pp. 329–336.

26. Radioactive contamination of wood and its products in *Journal of Environmental Radioactivity* 55(2):179-86 · February 2001 with 37 Reads DOI: 10.1016/S0265-931X(00)00191-0 · Source: PubMed.

27. Radioactive Contamination of Wood in the Chernobyl Zone I.V. Turlay, G.A. Chernushevich, V.V. Peretruxhin, V.V. Tereshko 2001 №2.

28. Calabrese, M., Quarantotto, M., Cantaluppi, C., Fasson, A. and Bogoni, P. (2015) Quality Characteristics and Radioactive Contamination of Wood Pellet Imported in Italy. *Open Journal of Applied Sciences*, 5, 183-190. <http://dx.doi.org/10.4236/ojapps.2015.55018>.

29. Szekely, J. G., Amiro, B. D., Rasmussen, L. R., Ford, B. (1994, January). Environmental assessment of radiological consequences for forestry in contaminated areas of the republic of Belarus. Consultant report to the World Bank. Washington, SA.

©**А.Н. Заикин** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», Zaikin.Anatolij@yandex.ru; **В.М. Меркелов** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», vmerkelov55@mail.ru; **Н.П. Малышева** – канд. экономич. наук, доцент, доцент кафедры ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», m_nadejda32@mail.ru.

Физико-механические процессы в деревообработке

УДК 674.093.6-413

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ПРИ КРУГОВОМ СПОСОБЕ РАСКРОЯ БРЕВЕН

Т. И. Глотова

В статье рассмотрены вопросы технологической подготовки производства пиломатериалов. Выбор способа раскря сырья с целью повышения количественного и качественного выхода пиломатериалов, и совершенствование методов расчета поставов являются важными составляющими совершенствования технологической подготовки пиломатериалов. Проблеме повышения качественного выхода пилопродукции уделено большое внимание как с теоретической, так и с практической точки зрения. Применение индивидуального способа раскря позволяет повысить качественный выход при раскря бревен, содержащих гиль. В работе уделено внимание разработке теоретических положений расчета поставов при круговом способе раскря. Предложенная методика расчета позволила теоретически обосновать преимущество применения кругового способа раскря бревен, содержащих гиль, по сравнению с бурсово-развальным способом раскря. В среднем разниця в количественном выходе пиломатериалов при круговом способе раскря составляет порядка 10 -14%.

Ключевые слова: технологическая подготовка, круговой способ раскря, теория раскря, объемный выход пиломатериалов

The article deals with the issues of technological preparation of timber production. The choice of the method for cutting raw materials to increase the quantitative and qualitative yield of sawn wood, and the improvement of methods for the calculation of supplies are important components for improving the technological preparation of sawn timber. The problem of improving the quality of sawn products is given great attention both from theoretical and practical points of view. The use of an individual cutting method makes it possible to increase the quality yield when cutting logs containing rot. The proposed calculation technique made it possible to theoretically substantiate the advantage of using a circular method for cutting logs containing guilleas, in comparison with the beam-split method of cutting. On average, the difference in the quantitative yield of sawn timber with a circular cutting method is of the order of 10 -14%.

Keywords: technological preparation, circular cutting method, cutting theory, bulk yield of sawn timber

Введение

Технологической подготовкой производства является совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства. К организации технологической подготовки следует относить информационное, математическое и техническое обеспечение, необходимое для выполнения функций технологической подготовки [1].

К технологической подготовке лесопильного производства можно отнести методы и средства планирования и управления процессом раскря пиловочных бревен на пиломатериалы. Задачей технологической подготовки производства пиломатериалов является обеспечение его стабильной работы при максимально возможном объемном и качественном выходе спецификационных пиломатериалов [2].

Проблема выработки пиломатериалов высокого качества существовала всегда, но особенно актуальной стала в настоящее время в связи с ухудшением качества пиловочного сырья и с увеличением его стоимости.

Если детально проанализировать требования к пиловочным бревнам, указанным в технической документации, то можно отметить, что введение деления круглых лесоматериалов в зависимости от качества древесины на четыре сорта в основном продиктовано ухудшением качества пиловочного сырья. В разделе 3 данного документа указано, что к бревнам первого сорта должны относиться в основном комлевые бревна с чистой древесиной, без пороков и с минимальными ограничениями по использованию. Ко второму сорту относятся бревна среднего и выше среднего качества без специальных

требований к древесине, с содержанием сучков средней для каждой породы. К третьему сорту отнесены бревна среднего и ниже среднего качества, и к четвертому относятся лесоматериалы круглые, которые, по своим характеристикам, не могут быть отнесены к вышеуказанным сортам [3].

Так же в данном документе отмечено, что в лесоматериалах допускается содержание ядровой гнили, размеры которой не превышают $1/3$ диаметра, на который она выходит.

Таки образом, можно отметить, что требования, предъявляемые к качеству сырья, резко снижены. Одновременно с этим возросли требования к качеству пиломатериалов со стороны потребителей. Поэтому создание и внедрение высокоэффективных средств, позволяющих повысить количественный и качественный выход пиломатериалов, является актуальным.

Проблеме повышения качества пиломатериалов посвящено значительное число работ. Наибольший вклад в теорию раскря сырья с учетом качества внесли проф. П.П. Аксенов, В.Ф. Ветшева, П.П. Анучин, И.Л. Белозеров, С.Н. Рыкунин [4, 5, 6, 7, 8].

Предметом исследований многих авторов является установление влияния качества пиловочного сырья, наличие различного вида пороков, их концентрация и состояние на качество получаемых пиломатериалов. Основным выводом которых является положение о необходимости сортировки сырья по качеству для получения пиломатериалов, соответственно, лучшего качества.

В настоящих экономических условиях функционирования большинство лесопильных производств вынуждено работать «с колес», т.е. покупать, доставлять сырье и тут же пускать его в распиловку. В этих условиях работы нет возможности накопить оперативный запас рассортированных по размерам и качеству бревен, нет возможности тщательно подготовить процесс раскря. Отсутствие сортировки бревен ведет к снижению как количественного, так и качественного выхода пиломатериалов.

Решать проблему повышения качества пиломатериалов, не прибегая к сортировке сырья, возможно при применении индивидуального способа раскря бревен на однопильных ленточно- или круглопильных станках.

Наиболее важные исследования в этом направлении проводились в работах [9]. В них приведены схемы индивидуального раскря фантовой древесины. В частности, рассмотрен рас-

кря бревен, содержащих гниль, размеры которой не превышают $1/3$ диаметра торца, на которой она выходит. При раскря таких бревен рекомендуется применять брусово-развальный способ, при получении бруса толщиной равной $0,7$ от вершинного диаметра, и с учетом вписания гнили в сердцевинную вырезку. Стоит отметить, что при этом значительная часть качественной древесины может попасть в вырезку, содержащую гниль. Как известно, при круговом способе раскря на одно пильном оборудовании раскря производится от периферии к центру бревна. Местоположение резов в бревне должно быть строго определено заранее, иначе при смещении пропила можно не получить желаемый размер досок по толщине. Таким образом, при индивидуальном раскря постав должен дополнительно содержать информацию о местоположении резов, позволяющих получить наибольший количественный и качественный выход пиломатериалов.

Целью исследования является разработка методики расчета поставов по круговому способу раскря, и установление влияния на объемный и качественный выход пиломатериалов, при индивидуальном раскря бревен, содержащих гниль, размера и способа вырезки порока.

Научной новизной являются аналитические закономерности, позволяющие произвести расчет поставов при круговом способе раскря бревен, содержащих гниль с целью повышения качества пиломатериалов.

Теоретическая значимость заключается в расширении теоретических положений теории раскря пиловочного сырья с учетом качества получаемых пиломатериалов.

Практическая значимость – расчет поставов при раскря низкокачественного сырья с целью повышения качества получаемых пиломатериалов и повышения точности нормирования расхода сырья при производстве обрезных пиломатериалов.

Методы и материалы

Методической основой послужили положения теории раскря бревен на пиломатериалы и методы оптимизации объемного выхода. Эмпирическую основу исследования составили размерно-качественная характеристика пиловочного сырья и спецификационных пиломатериалов. Для исследования были использованы данные о пиловочных бревнах, содержащих ядровую гниль.

Результаты исследований

Методика расчета поставов по круговому способу раскря основывается на традиционной методике расчета с учетом получения вырезки не превышающей размер порока.

Исходными данными для расчета являются данные о размерно-качественной характеристике сырья: вершинный диаметр бревен, длина и размер ядровой гнили; данные о размерно-качественном составе получаемых пиломатериалов.

Индивидуальный способ раскря, как правило, осуществляется на однопильных станках. Применение такого вида оборудования дает возможность вращать бревно вокруг оси при его базировании. При этом, чаще всего, бревно поворачивается либо на 90° , либо на 180° и центрируется таким образом, чтобы пропилы выполнялись параллельно оси бревна.

Первоначальное базирование ничем не отличается от базирования на лесопильных рамах, так как раскрой бревна идет параллельно его оси. Расчетная схема раскря приведена на рисунке 1а.

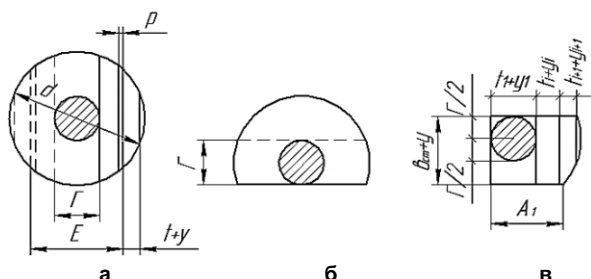


Рис. 1. Схема раскря при круговом способе:
d – диаметр бревна в вершине; Γ – гниль; $t+y$ – толщина доски с усушкой; p – толщина пропила; $b_{ct}+y$ – ширина доски с усушкой; A_1 – меньшая часть трехкантного бруса

Для того, чтобы определить ширину и длину доски, первоначально необходимо определить расход ширины постава E (рисунок 1), как расстояние между плоскостью пропила и линией предполагаемого симметричного пропила. На рисунке 1а это пропил показан пунктирной линией.

Расчет поставов в этом случае будет проводиться от центра к периферии, тогда как раскрой производится в обратном направлении. Поэтому данный параметр расхода ширины в данном случае является весьма важным, так как определяет местоположение реза в бревне.

Расход ширины постава E_1 для доски толщиной t_1 , следующей за вырезкой, содержащей

гниль, будет определяться с учетом размера данной вырезки.

$$E_1 = 1/3 d_b + 2(t_1 + y_1 + p), \quad (1)$$

где d_b – диаметр бревна в вершине;

y_1 – припуск на усушку для 1-ой доски;

p – толщина пропила.

Для всех остальных досок расход ширины E_i рассчитывается по формуле

$$E_i = E_{(i-1)} + 2(t_i + y_i + p) \quad (2)$$

где $E_{(i-1)}$ – расход ширины постава для предыдущей доски;

t_i – толщина i-ой доски;

y_i – припуски на усушку для i-ой доски.

Расчетная ширина доски определяется с учетом получения максимального объемного выхода пиломатериалов. Для этого из ряда спецификационных ширин выбирается b_{ct} значение ширины доски и рассчитывается длина обрезной доски

$$l = \text{int}((L_b - (d_f - d_b/c) + S/2)/S) S, \quad (3)$$

где L_b – длина бревна;

d_f – диаметр поперечного сечения бревна, в который без обзола вписывается доска определенной ширины и длины не менее минимально допустимой;

c – сбеж бревна;

S – установленный шаг изменения длины боковых досок.

Диаметр поперечного сечения определяется исходя из величины E_i и спецификационной ширины доски b_i

$$d_f = ((b_{ct} + y)^2 + (E_i)^2)^{1/2}. \quad (4)$$

Оптимизация осуществляется путем сравнения результатов вычислений объема доски для каждой комбинации ширины и длины доски и выбора варианта, обеспечивающего максимальное значение объема.

При повороте бревна на 90° оставшуюся часть укладывают на пропиленную пласт (рис. 1 б).

Как и для первого прохода, для текущей доски определяется расход ширины постава.

Выбор спецификационных ширин досок производится с учетом того, что доска может быть получена только из оставшейся части бревна. Для этого после расчета расхода ширины постава необходимо сравнить его со значением вершинного диаметра бревна.

Если расход ширины не превышает значения вершинного диаметра, то ширина доски B_p определяется по формуле

$$B_p = (((d_b)^2 - (E_i)^2)^{1/2} + \Gamma) / 2. \quad (5)$$

Для досок, у которых расход больше вершинного диаметра, ширина определяется по формуле

$$B_p = (0.577((D)^2 - (E_i)^2)^{1/2} + \Gamma) / 2, \quad (6)$$

где D – диаметр бревна в комле.

Выбранная спецификационная ширина доски не должна превышать полученного расчетного значения. Далее производится расчет длины доски по формуле (3) с учетом того, что d_f определяется по формуле

$$d_f = 2((E_i/2)^2 + ((b_{ст} + y) - \Gamma/2)^2)^{1/2}. \quad (7)$$

Расчет постава при повороте оставшейся части бревна на 90° производится по выше представленной методике.

Рассмотрим расчет постава при раскросе трехкантного бруса (рис. 1 в), который производится по схеме:

1) из числа спецификационных досок выбираются толстые доски, для которых толщина $(t_1 + y)$ больше диаметра гнили;

2) далее выбираются доски, у которых спецификационная ширина совпадает с толщиной бруса $(b_{ст} + y)$;

3) определяется меньшая из параллельных пластей бруса A_1

$$A_1 = (((db)^2 - ((b_{ст} + y) - \Gamma/2)^2)^{1/2}. \quad (8)$$

4) определяется количество досок n , вписываемых в пласт бруса A_1

$$n = (A_1 - \Gamma/2) / (t + y + p), \quad (9)$$

где t – толщина толстых досок;

y – припуск на усушку;

p – толщина пропила.

Для толстых досок определяют расход ширины постава E_r , мм

$$E_r = ((t + y)n) + p(n + 1) + \Gamma. \quad (10)$$

Ширина досок, у которых расход ширины не превосходит ширину пласти, равна толщине трехкантного бруса.

Когда ширина постава становится больше ширины пласти бруса, то ширину доски определяется по формуле (5,6), а длину по формуле (3 и 7).

Для всех полученных досок определяется объемный выход, который является показателем объемного использования древесины.

На основе предложенной методики расчета поставов выполнен сравнительный анализ влияния на объемный выход спецификационных пиломатериалов способа раскроса бревен, содержащих ядровую гниль.

Были составлены и рассчитаны постава по брусово-развальному способу раскроса, когда толщина бруса принималась равной в пределах от 0,6 до 0,8 вершинного диаметра. При этом из общего объема полученных пиломатериалов исключался объем вырезки, содержащий гниль. Так же были произведены расчеты по предложенной методике.

Исходными данными для расчета постава послужила спецификация сырья и получаемых пиломатериалов деревообрабатывающего предприятия, продукцией которого является тара специального назначения. На предприятии осуществляется раскрой хвойных лесоматериалов, средний диаметр которых составляет 32 см и длиной 6,5 м.

Таблица 1 - Результаты расчетов поставов по брусово-развальному способу

Постав		Расход шири- ны, мм	Ширина доски, мм	Длина доски, м	Полезный выход, %				
Толщина, мм	Кол-во досок, шт.								
d = 32 см, D = 39,5 см, L = 6,5 м, V = 0,64м ³									
Первый проход									
225	1	228,9	224						
25	2	287,3	150	5,75	6,74				
25	2	345,7	100	1,75	1,37				
Второй проход									
60	2	125,2	225	6,5	27,4				
40	2	214	200	6,5	16,2				
25	2	272,4	150	6,5	7,62				
25	2	330,8	125	2,5	2,44				
Итого:					61,8				
Диаметр вырезки с пороком: (1/3 d) = 113 мм:					27,4				
Объем пиломатериалов с учетом вырезки:					34,4				

Технические требования на продукцию устанавливают строгие ограничения на качество получаемых пиломатериалов. Поэтому особое внимание уделяется вопросам повышения каче-

ства путем применения более совершенных способов раскря.

Пример выполненных расчетов представлен в таблице 1.

Расчет по круговому способу основывался на том, что размер гнили не превышает одной трети диаметра раскраиваемого бревна, и объем потерь учитывается в процессе расчета.

В результате проведенных исследований было установлено что, средневзвешенный объемный выход при брусово-развальном способе раскря составил 34,42 %. Средневзвешенный объемный выход при круговом способе составил 57,8 % [10].

Следовательно, предлагаемая методика раскря может быть использована при расчете поставов по круговому способу раскря, что позволит значительно повысить достоверность расчетов по технологической подготовке производства пиломатериалов.

Пример выполненных расчетов поставов по предлагаемой методике представлен в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты расчетов поставов по круговому способу

Постав		Расход шири- ны, мм	Ширина дос- ки	Длина доски, м	Полезный вы- ход, %
Толщина, мм	Кол-во до- сок, шт.				
d = 32 см, D = 39,5см, L = 6,5 м, V = 0,64 м³					
I базирование					
Г=113	1	113,3			
60	1	242,3	225	6,5	12,2
25	1	299,7	175	5,5	3,3
25	1	356,9	125	3,0	1,3
II базирование					
Г=113	1	113,3			
40	1	201,3	200	6,5	7,2
25	1	258,5	175	6,5	5,5
25	1	315,7	125	6,0	5,4
25	1	372,9	100	2,5	0,8
III базирование					
Г=113	1	128,4			
25	1	185,6	200	6,5	4,6
25	1	242,8	175	6,5	3,9
25	1	300	150	5,0	2,9
25	1	357,2	125	2,5	1,1
IV базирование					
Г=113	1	113,3			
	1	170,5	125	6,5	2,8
25	1	227,7	125	6,5	2,8
25	1	284,9	125	6,5	2,8
25	1	342,1	125	3,5	1,5
					57,8

Выводы

1. Применение кругового способа раскря при распиловке бревен с ядровой гнилью на одно пильных ленточно- или круглопильных станках позволяет повысить количественный и качественный выход пиломатериалов.

2. Разработанная методика расчета поставов при круговом способе раскря пиловочных бревен позволяет рассчитывать поставки по индивидуальному раскря бревен, содержащих гниль, тем самым повышая точность нормирования расхода сырья.

Литература

1. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий [Текст]: ГОСТ 14.004-83.-Изд. с февр. 2009 с Изм. 1,2 (ИУС 5-87, 12-88).- Взамен ГОСТ 14.004-74; введ. 01.07.83
2. Калитеевский Р.Е. Лесопиление в XXI веке. Технология, оборудование, менеджмент[Текст]/ Р.Е. Калитеевский.- СПб.: ПрофиКС, 2008. - 496 с.
3. Лесоматериалы круглые хвойных пород. Технические условия[Текст]: ГОСТ 9463-2016.- Изд. с июль 2016 .- Взамен ГОСТ 9463-88; введ. 01.05.16.
4. Веретенкин, Д.Г. Влияние сучков на ценностный коэффициент сосновых и еловых пиломатериалов [Текст] / Д.Г. Веретенников, А.М. Черный // Науч. тр. / ЦНИИМОД, 1984. – 135 с.
5. Пуолокайнен, Л.М. Зависимость выхода экспортных еловых пиломатериалов от размерно-качественных характеристик пиловочного сырья [Текст] / Л.М. Пуолокайнен :Дис. канд. техн. наук. – Петразаводск, 1983. – 153 с.
6. Рыкунин С.Н. Об использовании особенностей сучковатости пиловочного сырья при раскря пиломатериалов [Текст] /С.Н. Рыкунин, В.С. Шалаев // Лесной вестник ,2013.-№ 3 С. 118-121.
7. Белозеров И.Л. Расчет поставов для максимального ценностного выхода обрезных пиломатериалов [Текст]/ И.Л. Белозеров // Деревообрабатывающая промышленность, 1988.- №10 С. 5-7.
8. Ветшева В.Ф. Организация раскря бревен с учетом качества пиловочника и вырабатываемой пилопродукции[Текст]/ В.Ф. Ветшева // Деревообрабатывающая промышленность, 2002.- №6 С. 10-12.

9. Боровиков А.М. Качество пиломатериалов [Текст]/ А.М. Боровиков. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 256 с.

10. Глотова Т.И. Теоретические аспекты раскря круглых лесоматериалов хвойных пород на горизонтальных ленточнопильных стан-

ках [Текст]/ Т.И. Глотова //Материалы международной онлайн-конференции «Современные технологии деревообрабатывающей промышленности». -Белгород. госуд. технол. ун-та им. В.Г. Шухова, 2018. С. 37-41.

© Т.И. Глотова - канд. техн. наук, доцент, кафедра «Технология деревообработки» ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», e-mail:glotowa.tatjana2016@yandex.ru.

УДК 674*416

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА СТРОГАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ НА ШПОН ВРАЩАЮЩИМСЯ МЕХАНИЗМОМ РЕЗАНИЯ

Р.Х. Гайнуллин, Р.Х. Гайнуллин, А.Н. Чемоданов, Е.М. Царев, С.Е. Анисимов

Наиболее изученными способами получения строганного шпона являются поперечное и продольное строгание древесины. Для данных способов получены различные поправочные коэффициенты, а также разработаны математические модели, характеризующие процесс строгания. Между тем, представляет определенный научный интерес процесс строгания древесины на шпон вращающимся режущим инструментом. Этот процесс является симбиозом поперечного и продольного видов строгания, требующий всестороннего изучения с математическим обоснованием и выработкой рекомендаций для проектирования оборудования. В статье представлены результаты моделирования процесса строгания древесины на шпон вращающимся механизмом резания, которые позволили определить рациональное расположение заготовки на приемном столе шпонострогального станка.

Ключевые слова: древесина, шпон, вращающийся механизм резания.

The most studied ways of obtaining planed veneer are the transverse and longitudinal planing of wood. Various correction factors have been obtained for these methods, and mathematical models describing the planing process have been developed. Meanwhile, there is a certain scientific interest in the process of planing wood on veneer with a rotating cutting tool. This process is a symbiosis of transverse and longitudinal planing, requiring comprehensive study with mathematical justification and development of recommendations for the design of equipment. The article presents the results of modeling the process of planing wood on veneer with a rotating cutting mechanism, which made it possible to determine the rational arrangement of the workpiece on the receiving table of the sprocket-cutting machine.

Key words: wood, veneer, rotating cutting mechanism.

Введение

Наряду с распространенными способами изготовления строганного шпона [1, 2] известен еще один [3, 4], согласно которого строгание осуществляется следующим образом. Несколько заготовок одного типоразмера объединяют в группу 1, устанавливают и фиксируют в пределах окружности 2, описываемой режущим инструментом 3, который совершает вращательное движение на пол-оборота и срезает с заготовок листы шпона 4. После чего происходит опускание групп заготовок 1 или подъем механизма резания 3 на величину толщины срезаемого шпона. Цикл повторяется до тех пор, пока

не будут обработаны установленные заготовки (рис. 1).

Как правило, разработка и внедрение новых технологий и оборудования для механической обработки древесины должны начинаться с изучения основных закономерностей рассматриваемого процесса. В данном случае процесс изготовления строганного шпона с использованием вращающегося механизма резания должен быть изучен с точки зрения силовых характеристик.

Целью настоящей работы является моделирование силовых характеристик процесса строгания древесины на шпон вращающимся механизмом резания и определение степени влияния основных переменных факторов.

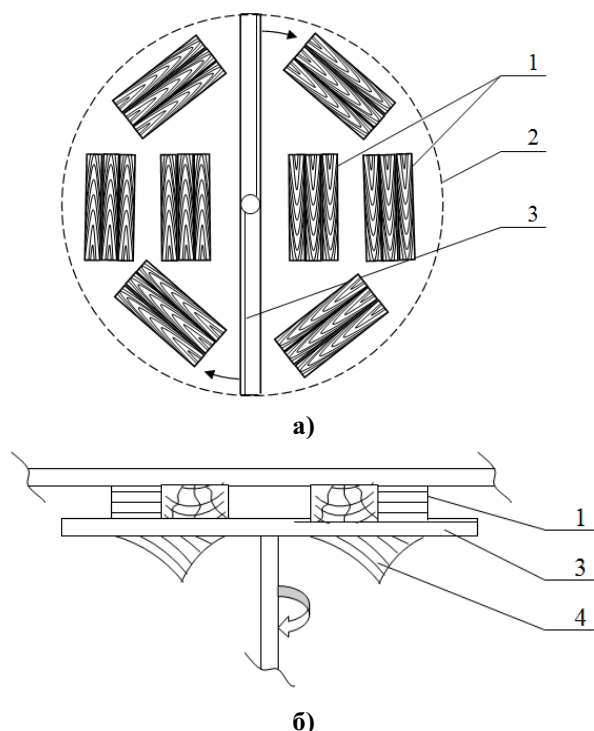


Рис. 1. Схема строгания древесины на шпон вращающимся режущим инструментом: а) вид сверху, б) вид сбоку; 1 – заготовки, 2 – описываемая рабочим органом окружность, 3 – рабочий орган, 4 – листы шпона

Методы и материалы

Для достижения указанной цели были проведены экспериментальные исследования [5], а также аналитическое моделирование исследуемого процесса [6].

Экспериментальные исследования включали в себя разработку модели шпонострогального станка с вращающимся механизмом резания, получение и обработку опытных данных. Исследования проводились с использованием древесины сосны влажностью 20 %. В качестве варьируемых факторов были выбраны толщина строгаемого шпона (1; 1,5; 2,0 мм) и степень обжима (10; 15; 20 %).

Аналитическое моделирование позволило получить теоретическую зависимость усилий резания при строгании древесины на шпон вращающимся режущим органом. Аналитико-экспериментальным методом получены численные значения поправочных коэффициентов, отражающих характер изменения энергосиловых показателей процесса.

Результаты

Основными интересующими результатами исследования с научной точки зрения являются поправочные коэффициенты, учитывающие

степень обжима древесины и толщину строгаемого шпона.

В таблице 1 приведены численные значения коэффициента, учитывающего степень обжима древесины при строгании, а на рисунке 2 – график его изменения.

Таблица 1 – Численные значения коэффициента, учитывающего степень обжима

Степень обжима, %	10	15	20
Значение коэффициента a_{Δ}	1,05	1,10	1,15

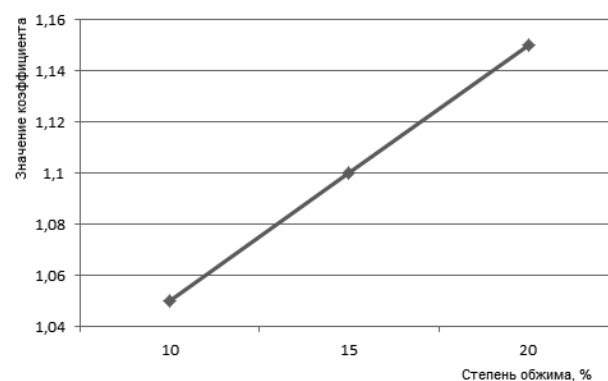


Рис. 2. График изменения коэффициента, учитывающего степени обжима

Согласно графику (рис. 2) можно сделать вывод о том, что с увеличением степени обжима значение коэффициента тоже увеличивается. Данное суждение не противоречит законам физики и основным канонам теории резания древесины [7-13].

Следующим является коэффициент, учитывающий толщину срезаемого слоя, численные значения которого представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Численные значения коэффициента, учитывающего толщину шпона

Толщина шпона, мм	1	1,5	2,0
Значение коэффициента a_h	1,0	0,75	0,72

На рисунке 3 приведен график его изменения, на котором видно, что с увеличением толщины срезаемого слоя происходит уменьшение значения данного коэффициента.

Этот факт тоже не противоречит законам физики и основам теории резания древесины, откуда известно: чем толще стружка, тем меньше нужно совершить работы на превращение единичного объема древесины в стружку [7-13].

Как уже было отмечено, основными величинами, оказывающими влияние на силовые показатели процесса строгания древесины на шпон вращающимся режущим инструментом, явля-

ются толщина срезаемого шпона и степень обжима. Для полноты исследования необходимо определить характер изменения усилия резания при строгании в зависимости от указанных параметров.

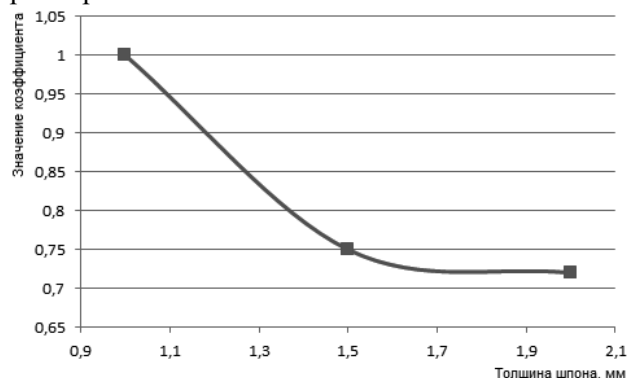


Рис. 3. График изменения коэффициента, учитывающего толщину срезаемого слоя

В качестве примера для определения степени влияния толщины срезаемого слоя примем степень обжима 10 %, а толщины срезаемого слоя – 1, 1,5 и 2 мм. Расчеты проведем с помощью программного пакета MS Excel. Тогда график изменения выходной величины будет выглядеть следующим образом (рис. 4).

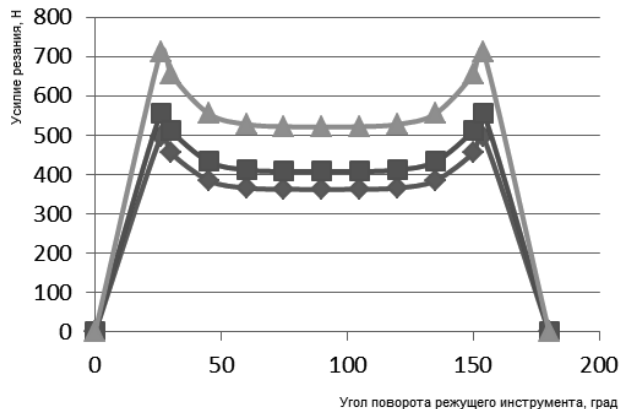


Рис. 4. График изменения усилия резания при строгании древесины вращающимся режущим инструментом слоя толщиной:

Из графика и проведенных расчетов видно, что с увеличением толщины срезаемого слоя от 1,0 до 1,5 мм происходит увеличение усилия резания при строгании древесины на 12,7 %, от 1,0 до 2,0 мм – на 43,9 %, от 1,5 до 2,0 мм – на 27,7 %. Аналогичные соотношения справедливы при степенях обжима древесины 15 и 20 %.

Величину влияния степени обжима древесины на усилие резания при строгании определим для шпона толщиной 1 мм при степенях

обжима 10, 15 и 20 %. График изменения представлен на рисунке 5.

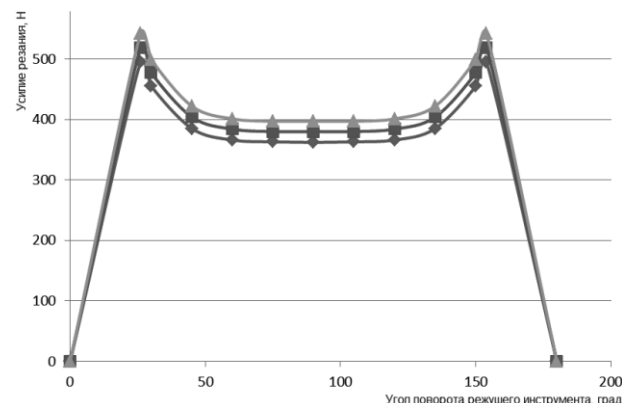


Рис. 5. График изменения усилия резания при строгании древесины вращающимся режущим инструментом при степени обжима:

— 10 %, — 15 %, — 20 %

Из графика и проведенных расчетов видно, что с увеличением степени обжима от 10 до 15 % происходит увеличение усилия резания при строгании древесины на 5,0 %, от 10 до 20 % – на 9,7 %, от 15 до 20 % – на 4,5 %. Аналогичные соотношения справедливы при толщинах шпона 1,5 и 2,0 мм.

На рисунке 6 среди геометрических характеристик присутствует величина d – расстояние от центра вращения режущего инструмента до заготовки.

Изменение этой величины влечет за собой изменение усилий резания при строгании. Эта величина влияет на длину контакта режущего инструмента и древесины b_p . Для более четкого понимания разобьем процесс на этапы и примем следующее допущение: проекция точки О, расположенная на заготовке, делит ее длину пополам.

В начальный момент времени (рис. 6, а) происходит внедрение режущего инструмента в древесину, что сопровождается поперечно-продольным строганием древесины. Угол $\varphi_{вх}$, при котором произойдет контакт, будет определяться в зависимости от длины заготовки L , ширины заготовки b и расстояния от центра вращения режущего инструмента до заготовки d

$$\varphi_{вх} = \arctg \frac{2d}{L}. \quad (1)$$

При дальнейшем продвижении режущего инструмента длина контакта постепенно увеличивается от нуля до максимального значения (рис. 6, б) и определится по следующему выражению

$$b_p = \frac{L}{2 \cos \varphi} - \frac{d}{\sin \varphi}. \quad (2)$$

Перемещение силового блока в промежутке $45^\circ < \varphi < 90^\circ$ характеризуется продольно-поперечным видом резания при строгании древесины.

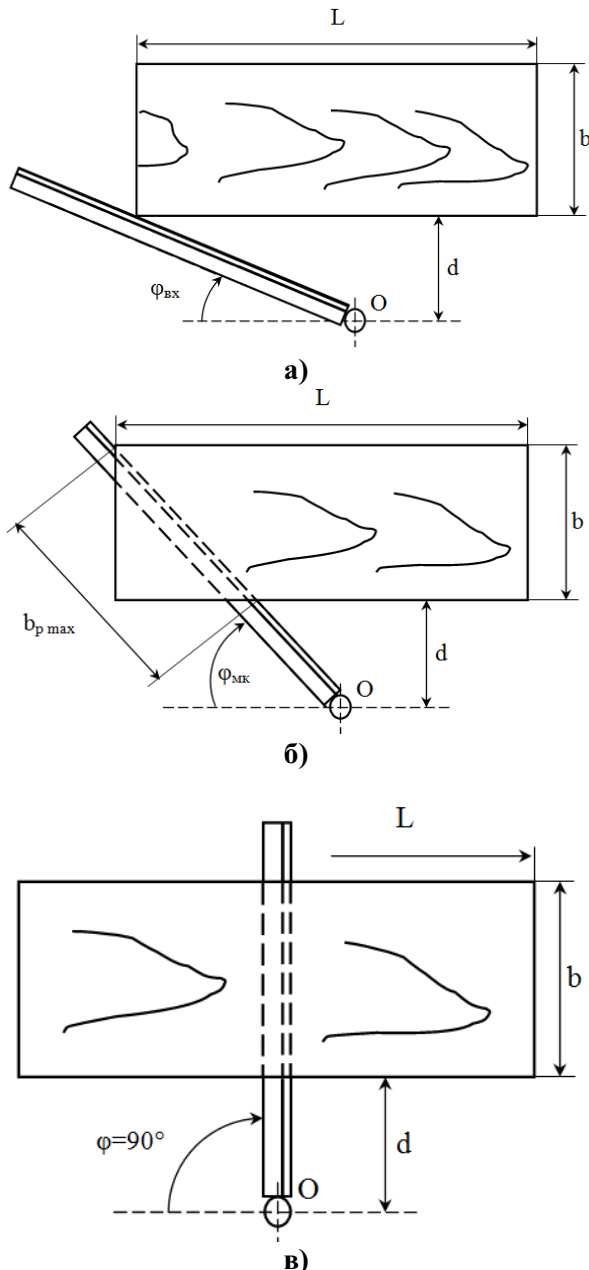


Рис. 6. Основные этапы процесса строгания древесины на шпон вращающимся режущим инструментом: а) внедрение ножевого блока в древесину, б) положение максимальной длины контакта режущего инструмента и древесины, в) перпендикулярное расположение ножевого блока относительно заготовки

Соответственно, угол φ_{mk} и длина $b_{p \max}$ максимального контакта режущего инструмента и древесины составят

$$\varphi_{mk} = \arctg \frac{2(b+d)}{L}, \quad (3)$$

$$b_{p \max} = \frac{b}{\sin \varphi_{mk}}. \quad (4)$$

В промежутке $\varphi_{mk} < \varphi < 90^\circ$ длина контакта режущего инструмента и древесины составит

$$b_p = \frac{b}{\sin \varphi}. \quad (5)$$

Следующей важной точкой является перпендикулярное расположение режущего инструмента относительно заготовки (рис. 6, в). В данный момент происходит продольное строгание древесины: угол $\varphi = 90^\circ$, а $b_p = b$.

Дальнейшее перемещение режущего инструмента будет являться зеркальным отражением вышеописанных этапов и закономерностей.

С использованием полученных ранее теоретических зависимостей [6] были получены графики изменения усилий резания при строгании древесины на шпон вращающимся режущим инструментом (рис. 7).

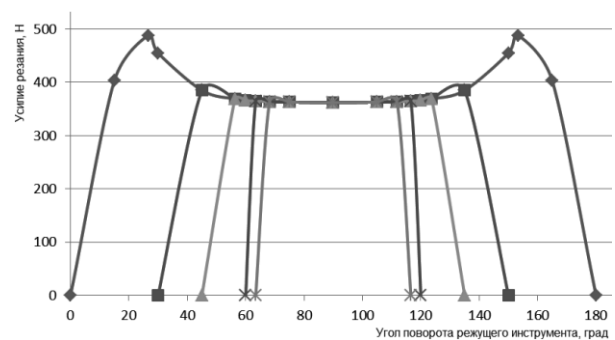


Рис. 7. График изменения усилия резания при строгании древесины вращающимся режущим инструментом: —♦— при $d=0$, —■— при $d=b$, —▲— при $d=2b$, —×— при $d=3b$, —*— при $d=4b$

График дает основание сделать вывод о том, что с увеличением расстояния от центра вращения режущего инструмента до заготовки (при неизменных ее размерах) от 0 до 4-х кратной ширины заготовки происходит снижение максимального (пикового) усилия резания при строгании древесины на 34,1 %. Данный факт подтверждается тем, что с увеличением величины d (рис. 6, б) увеличиваются углы входа $\varphi_{вх}$ (1) и положения максимального контакта режущего инструмента и древесины φ_{mk} (3), что влечет за собой уменьшение величины максимальной длины контакта режущего инструмента и древесины (4).

Изменение угла $\varphi_{\text{мк}}$ от 45 градусов незначительно влияет на усилие резания, которое изменяется в пределах статистической погрешности. Это связано с незначительными изменениями энергосиловых характеристик, поскольку преобладает продольно-поперечный вид резания.

При проектировании оборудования, работающего по предложенной технологии, важной физической величиной будет являться крутящий момент, необходимый для преодоления сил резания и диссипативных сил при вращении режущего инструмента. Его значение для преодоления сил резания определяется из выражения

$$M_{\text{кр}} = P_{\text{бл}} \cdot R, \quad (6)$$

где $M_{\text{кр}}$ – крутящий момент, Н·м,

$P_{\text{бл}}$ – максимальное значение силы резания при строгании древесины на шпон вращающимся режущим инструментом, Н,

R – плечо силы, м.

Для простоты дальнейших расчетов и наглядности примем следующие условия: толщина шпона 2,0 мм, степень обжима 20 %. С использованием полученных ранее теоретических зависимостей усилия резания [6] и с учетом (6) произведены расчеты значений моментов сил резания при строгании древесины на шпон, которые графически можно отразить в виде рисунка 8, где переменным фактором является величина d – расстояние от центра вращения режущего инструмента до заготовки.

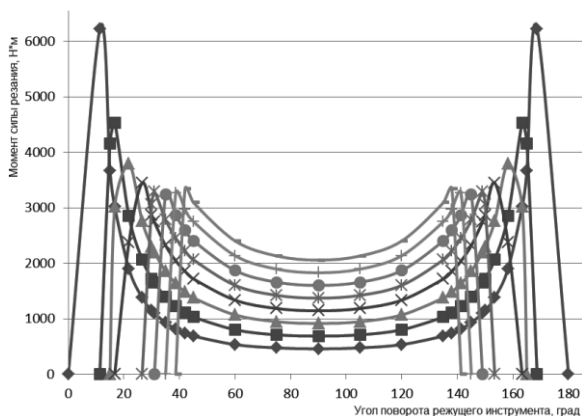


Рис. 8. График изменения моментов сил резания при строгании древесины вращающимся режущим инструментом: — при $d=0$, — при $d=0,1$ м, — при $d=0,2$ м, — при $d=0,3$ м, — при $d=0,4$ м, — при $d=0,5$ м, — при $d=0,6$ м, — при $d=0,7$ м

Из проведенных расчетов и графика можно сделать следующие основные выводы.

При $d=0$ величина максимального (пикового) значения момента силы превосходит минимальное значение в 13,6 раза. При $d=0,7$ м данное соотношение составляет 1,6. Соотношения максимальных и минимальных значений моментов при указанных значениях d составляют соответственно 1,9 и 0,2, т.е. при увеличении расстояния от центра вращения режущего инструмента до заготовки происходит снижение максимального и увеличение минимального значений моментов сил резания при строгании. На графике можно заметить, что с увеличением величины d происходит снижение максимального момента сил резания до определенного значения, после которого происходит дальнейший его рост. Следовательно, имеется экстремум.

На величину и расположение экстремума среди кривых будут оказывать непосредственное влияние не только расстояние от центра вращения режущего инструмента до заготовки d , но и геометрические размеры самой заготовки. Например, изменение ширины заготовки отражается следующим образом (рис. 9).

Данный график построен для заготовок различной ширины по максимальным моментам сил резания при изменении величины d от 0 до 0,8 м. По мере увеличения ширины строганной заготовки следует уменьшать расстояние от центра вращения режущего инструмента до заготовки.

Противоположный вывод можно сделать, анализируя влияние длины заготовки на максимальный момент сил при строгании древесины (рис. 10).

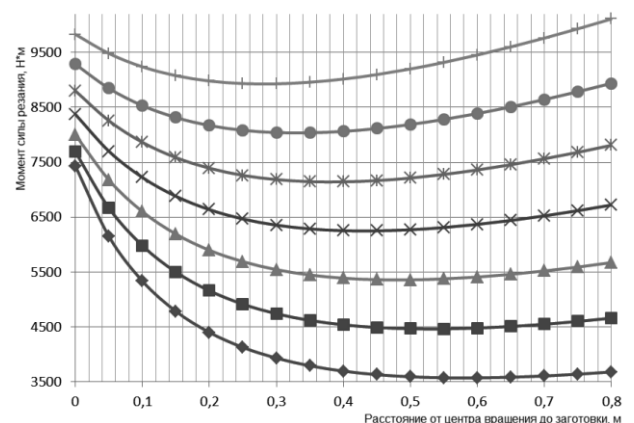


Рис. 9. График изменения моментов сил резания при строгании древесины вращающимся режущим инструментом: — при $b=0,2$ м, — при $b=0,3$ м, — при $b=0,35$ м, — при $b=0,4$ м, — при $b=0,45$ м, — при $b=0,5$ м

Увеличение длины заготовки приводит к необходимости увеличения расстояния от центра вращения режущего инструмента до заготовки.

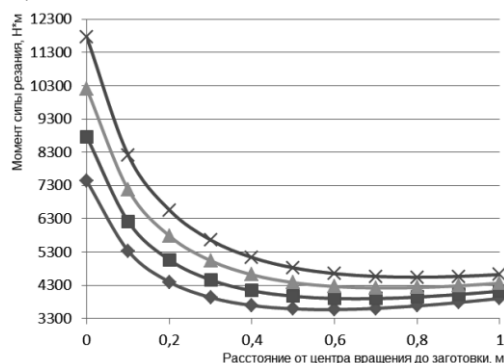


Рис. 10. График изменения моментов сил резания при строгании древесины вращающимся режущим инструментом: — при $L=2,2$ м, — при $L=2,4$ м, — при $L=2,6$ м, — при $L=2,8$ м

Таблица 3 – Рациональное расстояние от центра вращения до заготовки, м

Длина заготовки, м	Ширина заготовки, м				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
2,0	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
2,2	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
2,4	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
2,6	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
2,8	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
3,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

Заключение

В данной работе на основании проведенных исследований процесса строгания древесины на шпон вращающимся механизмом резания были выявлены основные закономерности изменения силовых характеристик.

Так, увеличение толщины получаемого шпона и степени обжима древесины приводят к увеличению усилия резания при строгании.

Аналогичным образом происходит изменение усилия резания и момента сил резания при увеличении геометрических характеристик заготовки.

Криволинейную зависимость изменения силовых характеристик процесса дает изменение величины расстояния от центра вращения режущего инструмента до заготовки. Данный факт позволил определить рациональное расположение заготовки на приемном столе шпонострогального станка.

Литература

1. Плахов, В.Н. Производство строганого шпона / В.Н. Плахов. – М.: Лесная промышленность, 1975. – 128 с.

В целом для определения рационального расположения заготовки на приемном столе шпонострогального станка с вращающимся механизмом резания проведены необходимые расчеты и получена таблица, которая отражает расстояние от центра вращения режущего инструмента до заготовки в зависимости от ее геометрических характеристик (таблица 3).

Рациональное расположение заготовок на приемном столе шпонострогального станка позволит снизить энергосиловые характеристики процесса, а также уменьшить динамическую нагрузку на трущиеся, сопряженные и шарнирно-сочлененные элементы оборудования.

2. Пат. 2090358. РФ, МКИ 6 В27L5/00. Способ изготовления строганого шпона и станок для его осуществления / Нестеренко А.И. № 93053294/13; Заявл. 26.11.93; Опубл. 20.09.97.

3. Пат. 2373047 РФ, МПК В27L5/00. Способ изготовления строганого шпона / Гайнуллин Рен.Х., Гайнуллин Риш.Х. (РФ) № 2008140549/12; Заявл. 13.10.2008; Опубл. 20.11.2009.

4. Пат. 2484952. РФ, МПК В27L5/06. Шпонострогальный станок / Гайнуллин иш.Х., Гайнуллин Рен.Х., Чемоданов А.Н., Анисимов С.Е., Царев П.Е. № 2011147949/13; заявл. 24.11.2011; опубл. 20.06.2013.

5. Чемоданов, А.Н. Результаты исследования процесса смешанного резания древесины на шпон / А.Н. Чемоданов, Рен.Х. Гайнуллин, Риш.Х. Гайнуллин // Лесной Вестник / М.: – 2016. № 6. – С. 67-72.

6. Чемоданов, А.Н. Определение силовых характеристик процесса смешанного резания древесины на шпон / А.Н. Чемоданов, Рен.Х. Гайнуллин, Риш.Х. Гайнуллин // Лесной Вестник / М.: – 2017. № 1. – С. 48-53.

7. Василевская, П.В. Анализ основных параметров процесса строгания шпона: Обзорная информация / П.В. Василевская, Л.Г. Красовская, Л.И. Троязыкова. – М.: ВНИПИ Элеспром, 1980. – 23 с.

8. Шелгунов, Ю.В. Технология и оборудование лесопромышленных предприятий: Учебник / Ю.В. Шелгунов, Г.М. Кутуков, Н.И. Лебедев. – 3-е изд. – М.: МГУЛ, 2002. – 589 с.

9. Воскресенский, С.А. Резание древесины / С.А. Воскресенский. – М.: Гослесбумиздат, 1955. – 200 с.

10. Чемоданов, А.Н. Расчет усилия резания при строгании шпона вдоль волокон древесины / А.Н. Чемоданов, Р.Х. Гайнуллин // Деревооб-

рабатывающая промышленность / М. – 2010. № 1. – С. 10-11.

11. Чемоданов, А.Н. Результаты исследования процесса продольного строгания древесины на шпон / А.Н. Чемоданов, Р.Х. Гайнуллин // Вестник МарГТУ / Йошкар-Ола:.. – 2010. № 1. – С. 40-45.

12. Laura, T. Ultrasound evaluation of lathe check depth in birch veneer / T. Laura, T. Markku, R. Lappalainen // Wood science and technology, 2009. – P. 27-35.

13. McKenzie, W. Measured strains in slow linear veneer cutting: Effects of nosebar form and gap / W. McKenzie, H. Karpovich // Wood science and technology, 1975. – P. 213-231.

©Р.Х. Гайнуллин – канд. техн. наук, доцент кафедры деревообрабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «ПГТУ»), GainylinRH@yandex.ru; Р.Х. Гайнуллин - канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры деревообрабатывающих производств ФГБОУ ВО «ПГТУ», gishat_000@mail.ru; А.Н. Чемоданов - канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедры деревообрабатывающих производств ФГБОУ ВО «ПГТУ», Chemodanov@volgatech.net; Е.М. Царев – д-р. техн. наук., профессор, профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий ФГБОУ ВО «ПГТУ», CarevEM@volgatech.net; С.Е. Анисимов - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры лесопромышленных и химических технологий ФГБОУ ВО «ПГТУ», AnisimovSE@volgatech.net.

УДК 684.4.059.1

ВЛИЯНИЕ СЕДИМЕНТАЦИИ ЧАСТИЦ МАТОВОЙ ДОБАВКИ В РАСТВОРАХ МЕБЕЛЬНЫХ ЛАКОВ НА СТЕПЕНЬ МАТОВОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОЗРАЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Б.М. Рыбин, И.А. Завражнова, Д.Б. Рыбин

Для матирования мебельных лаков применяют синтетические формы диоксида кремния, имеющего различные модификации. Наибольший интерес представляет пирогенетический аморфный диоксид кремния, выпускаемый фирмой «Дегусса». Он представляет собой порошок, состоящий из сферических частиц коллоидальных размеров. Представителем матирующего средства на основе пирогенетического диоксида кремния является добавка ТК-800. К такому же виду добавок относится матирующее средство Сантосел-68 выпускаемый фирмой «Монсанта». Кроме пирогенетического диоксида кремния фирма «Дегусса» выпускает осажденный аморфный диоксид кремния, получаемый в результате химических реакций, протекающих в водной среде.

Представителем матирующего средства на основе осажденного аморфного диоксида кремния является добавка ОК-412. Вторичные частицы этого вещества в результате специальной обработки покрыты органическим слоем, что позволяет по сравнению с другими матирующими средствами, находиться частицам добавки во взвешенном состоянии в лаковых композициях. Отсюда в лаках для отделки деталей из древесины и древесных материалов при длительном хранении может наблюдаться седиментация частиц матовой добавки. Если не предусмотреть размешивание их растворов перед нанесением на поверхности деталей, то пробы, отобранные с разных глубин емкости, будут иметь различный объем матовой добавки. Различное ее содержание на поверхности покрытий приведет к возникновению различной шероховатости, что скажется на блеске получаемой поверхности. В некоторых случаях это явление делает затруднительным комплектовать детали между собой, особенно выходящие на лицевые и фасадные поверхности изделия. В работе рассматриваются вопросы седиментации частиц матовых добавок, используемых в отечественных мебельных лаках.

Ключевые слова: матовые добавки, лаковые покрытия, седиментация частиц добавки.

Matting furniture lacquers used synthetic forms of silica have various modifications. The most interesting is the pyrogenetic amorphous silicon dioxide produced by Degussa." It is a powder consisting of spherical particles of colloidal dimensions. The representative of the mattifying agent on the basis of pyrogenetic silicon dioxide is the additive TK-800. To the same kind of additives applies a matting agent Santosa-68 manufactured by the company Monsanto." In addition to pyrogenetic silicon dioxide, Degussa produces precipitated amorphous silicon dioxide obtained as a result of chemical reactions occurring in the aqueous medium. The representative of the matting agent based on the precipitated amorphous silicon dioxide is the additive OK-412. The secondary particles of this substance as a result of special treatment are coated with an organic layer, which allows, in comparison with other matting agents, to be the particles of the additive in a suspended state in lacquer compositions. Hence, in lacquers for finishing of wood and wood-based materials during long-term storage can occur sedimentation of particles of matte additive. If you do not provide for mixing their solutions before applying to the surface of the parts, the samples taken from different depths of the container will have a different volume of the matte additive. Its different content on the surface of coatings will lead to the appearance of different roughness, which will affect the gloss of the resulting surface. In some cases, this phenomenon makes it difficult to complete parts with each other, especially overlooking the front and front surfaces of the product. The paper deals with the sedimentation of matte additives particles used in domestic furniture varnishes.

Keywords: matt additives, varnish, sedimentation of the particles of the additive.

Введение

Для матирования мебельных лаков в основном применяют синтетические формы диоксида кремния. В настоящее время известны различные модификации его, имеющие один и тот же химический состав SiO_2 . При этом каждая модификация, и даже различные ее разновидности, имеют свои отличительные особенности. К ним можно отнести загущающий и тиксотропный эффекты в растворах, предотвращение расслаивания наполненных композиций, хорошая диспергируемость в большинстве полимеров и другие.

Наибольший интерес в матировании лаков представляет пирогенетический аморфный диоксид кремния, выпускаемый фирмой «Дегусса» [1]. Он представляет собой порошок, состоящий из сферических частиц коллоидальных размеров. К недостаткам пирогенетического диоксида кремния следует отнести чрезмерное повышения вязкости и ухудшение текучести полимерных композиций. Так вязкость возрастает в системах на основе высокополярных веществ, как этиленгликоль или глицерин [2 с. 178].

Представителем матирующего средства на основе пирогенетического диоксида кремния является добавка ТК-800. Ее получают в процессе гидролиза тетрахлорида кремния в токе кислородно-водородного пламени. Вследствие высоких температур в процессе получения добавки, ТК-800 представляет собой инертный порошок, у которого при сушке наблюдаются незначительные потери массы. Во время хранения порошок мало впитывает влаги из воздуха. Для введения в лаковые системы предлагается непродолжительное диспергирование на скором

смесителе [3]. Благодаря значительным размерам вторичных структур (агломератов) от 2 до 10 мкм [1], в лаковых системах ярко проявляется эффект матирования.

К такому же виду добавок относится матирующее средство Сантосел-68 выпускаемый фирмой «Монсанта». Частицы добавки проявляют малую склонность к осаждению в лаковой композиции. Лаки, содержащие это матирующее средство, образуют покрытия с шелковистым блеском.

Кроме пирогенетического диоксида кремния фирма «Дегусса» выпускает осажденный (гидратированный) аморфный диоксид кремния, получаемый в результате химических реакций, протекающих в водной среде (мокрый способ). Осажденный аморфный диоксид кремния представляет порошок с частицами коллоидальных размеров сферической формы.

Представителем матирующего средства на основе осажденного аморфного диоксида кремния является добавка ОК-412. Вторичные частицы этого средства в результате специальной обработки покрыты органическим слоем, что позволяет по сравнению с другими матирующими средствами, находиться частицам добавки во взвешенном состоянии в лаковых композициях

Целью данной работы являлось изучение влияния седиментации частиц матовой добавки в жидкой лаковой композиции на степень матовости прозрачного покрытия на древесине и древесном материале.

Материалы и методы

В основе статьи положены результаты и исследований, выполненные отечественными ин-

ститутами ГИПИЛКП, ВПКТИМ и МЛТИ. В качестве лаков, содержащих перечисленные матовые добавки, рассматривались нитроцеллюлозный НЦ-243, полиуретановый УР-2104 и мочевиномеламиналкидный МЛ-2111 [4]. Провести исследования подобного рода по современным импортным аналогам не представляется возможным, т.к. фирмы производители лаков, содержащих матовые добавки, ограниченно раскрывают информацию по этому вопросу.

Для исследования седиментации частиц матовой добавки лаки длительное время хранились в стеклянных литровых сосудах без перемешивания содержимого. Затем с определенной глубины сосудов были отобраны пробы, на основе которых подготавливались покрытия на образцах. Для оценки качества контролируемых поверхностей использовался профилометр, с помощью которого определялась шероховатость покрытия.

Результаты и обсуждения

Матовые добавки, используемые в отечественных лаках, обладают полидисперсностью частиц. Это объясняется различными факторами, оказывающими влияние в процессе их приготовления. Обычно фирмы-поставщики не дают полную характеристику о полидисперсности матовых добавок. Отсутствие этих данных не позволяет связать полидисперсность с плотностью упаковки частиц в покрытии. Для рассмотрения этого вопроса использована методика, приведенная в [2], основанная на работе Фурнаса [5]. В ней развит практически удобный метод определения незанятого объема (объема пустот) для частиц одинаковой формы с заданным набором размеров. Этот метод позволяет выбрать характеристические размеры частиц для конкретной матовой добавки.

Рассмотрим ступенчатый подбор фракций вторичных структур матовых добавок ТК-800, ОК-412 и Сантосел-68 для получения максимальной плотности упаковки частиц.

В таблице 1 приведены исходные данные и результаты ступенчатого подбора фракций матовых добавок для получения максимальной плотности упаковки частиц.

Средний размер наиболее мелких частиц составляет для матовых добавок 0,01 мкм по [6]. Из технической характеристики средний размер наиболее крупных вторичных частиц для ТК-800, ОК-412 и Сантосел-68 соответственно составит 10; 8 и 6 мкм. Количество не-

обходимых фракций при плотной упаковке, для перечисленных матовых добавок, не превышает двух. Средние размеры частиц промежуточной фракции между наиболее крупными и наиболее мелкими частицами для рассматриваемых матовых добавок не превышают 1 мкм.

Отсюда, по данным таблицы 1 крупная фракция матовых добавок, представленная средними размерами частиц 10; 8 и 6 мкм соответственно для ТК-800, ОК-412 и Сантосел-68, составляет наибольший удельный вес, и поэтому она будет определять свойства исследуемых матовых добавок.

При длительном хранении матовых лаков происходит оседание частиц матовой добавки. Если перед пуском в производство лак тщательно не перемешивать, то рабочие пробы, отобранные с разной глубины емкости, будут содержать различное количество частиц матовой добавки в единице объема основы лака. То есть рабочие пробы будут иметь различную концентрацию матовой добавки. Чем ближе к дну емкости отобраны рабочие пробы, тем более концентрированные матовой добавкой будут лаковые композиции, наносимые на подложку.

Для исследования этого явления лаки УР-2104, МЛ-2111 и НЦ-243, содержащие матовые добавки, были поставлены на длительное хранение в литровые сосуды цилиндрической формы. Наблюдали за образованием слоя осветленной жидкости в верхней части сосудов. Продолжительность эксперимента составила около 1 года. Поскольку частицы матовой добавки имеют различный фракционный состав, то образование осветленной жидкости в верхней части сосудов позволяло определить момент оседания из этой части сосуда не только крупных, но и мелких частиц матовой добавки. Наблюдения позволяли оценить количественно седиментацию промежуточной мелкой фракции частиц матовой добавки.

На рисунке 1 приведены графики, представляющие кинетику осаждения матовой добавки в лаках. Из трех наблюдаемых составов быстрее идет накопление осадка у лака НЦ-243, медленнее у лаков УР-2104 и МЛ-2111. Полученные данные позволяют определить скорость оседания частиц матовой добавки промежуточной мелкой фракции, которая составила для лаков УР-2104, МЛ-2111 и НЦ-243 соответственно 0,00021; 0,0015; 0,0042 мкм/с.

Таблица 1 - Исходные данные и результаты ступенчатого подбора фракций матовых добавок для получения максимальной плотности упаковки частиц

Наименование показателя	Условное обозначение	Численное значение для матовой добавки		
		ТК-800	ОК-412	Сантосел-68
Средний размер наиболее крупных частиц	$d_{1, \text{мкм}}$	10	8	6
Средний размер наиболее мелких частиц	$d_s, \text{мкм}$	0,01	0,01	0,01
Объемная доля пустот во фракциях:	V_1	0,5	0,5	0,5
- Крупных частиц	V_s	0,5	0,5	0,5
- Мелких частиц				
Коэффициент	$K = \frac{d_s}{d_1}$	0,0010	0,0012	0,0016
Общее число фракций (определено по графику [2] рис. 1.5 с. 29)	n	2,92	2,87	2,85
Количество необходимых фракций	$m = n - 1$	1,92	1,87	1,85
Коэффициент	$R_s = K^{\frac{1}{m}}$	0,091	0,085	0,0287
Средний размер частиц промежуточной фракции между d_s и d_1	$d_2 = R_s \cdot d_1, \text{мкм}$	0,91	0,595	0,143
Объемная доля пустот во фракции с размерами частиц d_2	V_2	0,5	0,5	0,5
Объемная доля фракций с размерами частиц:	$S_1 = \frac{1}{1 + V_1}$	0,667	0,667	0,667
- d_1	$S_2 = \frac{V_1}{1 + V_2}$	0,333	0,333	0,333
- d_2				
Максимальная объемная доля частиц	$P_f = \sum S - (\sum S) \cdot V_1^2$	0,75	0,75	0,75
Объемная доля пустот	$V_v = 1 - P_f$	0,25	0,25	0,25
Массовая доля частиц фракций	$G_1 = S_1 \cdot \rho$ $G_2 = S_2 \cdot \rho$	1,46 0,73	1,26 0,63	1,14 0,56

Применительно к сферическим частицам скорость их оседания согласно [7] можно определить из следующего уравнения

$$U = \frac{2r^2}{9\mu} \cdot (D_0 - D_{\text{л}}) \cdot g, \quad (1)$$

где r – радиус частицы, см;
 μ – динамическая вязкость раствора (лака), г/см·с;
 D_0 – плотность вещества частицы, г/см³;
 $D_{\text{л}}$ – плотность основы лака, г/см³;
 g – ускорение свободного падения, см/с².

В литературе по деревообработке для лаков, как правило, приводятся значения условной вязкости по вискозиметру ВЗ-246, которая является мерой истечения 100 мл лака через от-

верстие диаметром 4 мм. Для определения значения кинематической вязкости ν (см²/с) было использовано приведенное в работе [8] уравнение.

$$\nu = 0,054\eta - 0,35, \quad (2)$$

где η – условная вязкость по ВЗ-246, с;

Динамическая вязкость μ , (г/см·с) согласно [9] может быть определена как произведение кинематической вязкости ν и плотности раствора $D_{\text{л}}$ или

$$\eta = \nu \cdot D_{\text{л}}. \quad (3)$$

В таблице 2 приведены исходные данные для определения скорости седиментации частиц матовой добавки в основе лаков.

Подставляя в формулу (1) исходные данные из таблицы 2 определим скорость оседания

частиц матовой добавки промежуточной мелкой фракции. Так для лаков УР-2104, МЛ-2111 и НЦ-243 скорость оседания частиц составила соответственно 0,00017; 0,0013 и 0,0035 мкм/с. Сравнение экспериментальных и расчетных данных скоростей оседания частиц промежуточной мелкой фракции показывает, что значения их по матовым добавкам каждого лака отличаются в пределах 25%. Отсюда, используемая формула (1) с достаточной степенью надежности описывает явление оседания частиц матовой добавки в лаковых композициях.

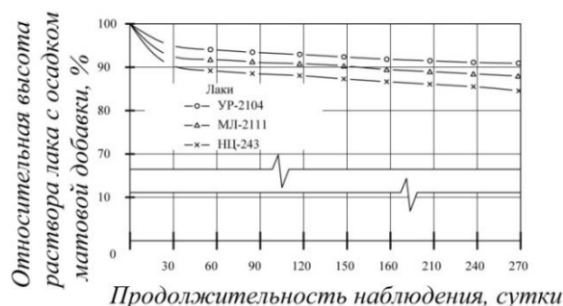


Рис. 1. Кинетика осаднения матовой добавки в лаках

Скорость оседания крупных частиц матовых добавок, используемых в лаках: УР-2104, МЛ-2111, НЦ-243, рассчитанная по (1) составит соответственно 0,3136; 0,2384; 0,4280 мкм/с. Можно видеть, что полученные значения скоростей оседания крупной фракции частиц матовых добавок, используемых в различных лаках, имеют один и тот же порядок и незначительно различаются между собой.

Наибольшую величину скорости оседания имеет матовая добавка, применяемая в лаке НЦ-243 и наименьшую в лаке МЛ-2111.

Отсюда полученные скорости оседания крупной фракции частиц матовых добавок должны приводить к достаточно быстрому расслоению растворов лаков при их длительном хранении без перемешивания. Свежеприготовленные растворы лаков содержат в каждом элементарном объеме одинаковое количество частиц матовой добавки по высоте емкости, в которой они находятся. При длительном хранении без перемешивания в растворе лака наблюдается различная послойная концентрация матовой добавки за счет ее интенсивной седиментации. В верхней части сосуда концентрация матовой добавки будет минимальна. Здесь преобладающими являются частицы мелкой фракции, поскольку их скорость седиментации меньше, чем у частиц крупной фракции. У дна сосуда кон-

центрация матовой добавки в единице объема лака постоянно увеличивается, т.к. сюда оседают частицы из выше расположенных слоев раствора [10].

В средней части сосуда длительное время сохраняется начальная концентрация матовой добавки в растворе лака. Доля этой части лака зависит от скоростей оседания крупной и мелкой фракции частиц матовой добавки. При длительном хранении лака без перемешивания происходит все большее оседание частиц матовой добавки и этот слой раствора лака, в котором наблюдается начальная концентрация матовой добавки, уменьшается по объему и постепенно со скоростью оседания частиц крупной фракции приближается ко дну сосуда.

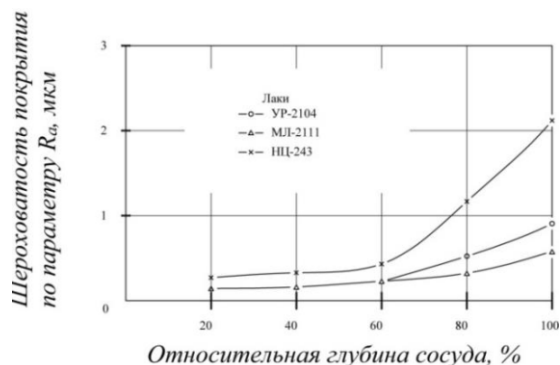


Рис. 2. Зависимость шероховатости матового покрытия при формировании пробами лаков, взятых с различной глубины сосудов, после длительной их выдержки

Отсюда, при длительном хранении лаков без перемешивания наблюдается изменение концентрации матовой добавки по высоте емкости, в которой находится лак. Покрытия, сформированные из проб лаков взятых с различной глубины емкости сосудов, отличаются по степени матовости контролируемых поверхностей [11].

Подтверждением этого являются приведенные на рисунке 2 зависимости шероховатости матовых покрытий при формировании пробами лаков, взятых с различной глубины сосудов, после длительной их выдержки. Как видно покрытия, приготовленные из проб лаков взятых с малой глубины емкостей, имеют меньшую шероховатость, чем покрытия, подготовленные из проб лаков, находящихся на большей глубине сосудов. Как и предполагалось, имеется объем лака в сосудах, где сохраняется постоянная концентрация матовой добавки. В некотором приближении на рисунке 2 это пробы лаков, отобранные с 20, 40 и 60% глубины сосудов.

Таблица 2 - Исходные данные для определения скорости седиментации частиц матовой добавки в основе лаков

Марка лака	Плотность лака, г/см ³ D_L	Условная вязкость лака, с η	Плотность вещества частицы, г/см ³ D_0	Средний радиус, мкм		Скорость оседания, мкм/с	
				Наиболее крупных частиц r_1	Частиц промежуточной фракции r_2	Наиболее крупных частиц U_1	Частиц промежуточной фракции U_2
УР-2104	0,990	15	1,71	3	0,071	0,3136	0,00017
МЛ-2111	1,010	31	1,90	4	0,297	0,2384	0,0013
НЦ-243	0,957	37	2,20	5	0,455	0,4280	0,0035

Если рассматривать матовую добавку, состоящую из моночастиц, то начальную концентрацию ее P (%) в растворе основы лака можно определить по формуле

$$P = \frac{m_g}{M_L} \cdot 100, \quad (4)$$

где m_g – масса матовой добавки, г;
 M_L – масса основы лака, г.
или

$$P = \frac{m_g}{V_L \cdot D_L} \cdot 100, \quad (5)$$

где V_L – объем основы лака, см³;
 D_L – плотность основы лака, г/см³.

При оседании частиц, в верхней части емкости образуется осветленный слой раствора лака, не содержащий матовую добавку высотой $U \cdot t_x$, где U – скорость оседания матовой добавки и t_x – время, в течение которого происходит оседание матовой добавки.

Концентрация матовой добавки P_x (%) в объеме основы лака, за исключением осветленного слоя, может быть определена по формуле

$$P_x = \frac{m_g}{(V_L - S \cdot U \cdot t_x) \cdot D_L} \cdot 100, \quad (6)$$

где S – площадь поперечного сечения сосуда, в котором хранится лак.

Произведя соответствующие преобразования, формулу (6) можно представить в следующем виде

$$P_x = P \frac{V_L}{V_L - S \cdot U \cdot t_x} \quad (7)$$

или

$$P_x = P \frac{1}{1 - \frac{S \cdot U \cdot t_x}{V_L}}. \quad (8)$$

Объем лака V_L можно представить в виде произведения $S \cdot H$, где H – высота раствора основы лака в сосуде с поперечным сечением S . Тогда (8) можно представить в следующем виде

$$P_x = P \frac{1}{1 - \frac{U \cdot t_x}{H}}. \quad (9)$$

При условии полидисперсной матовой добавки ее концентрация в объеме лака при оседании частиц будет зависеть от объемной доли фракций частиц различного размера и их скорости оседания за время t_x . В нашем случае матовые добавки содержат фракцию с крупными частицами радиусом r_1 и промежуточную фракцию радиусом r_2 . Объемная доля этих фракций была принята (таблица 1) соответственно $S_1 = 0,667$ и $S_2 = 0,333$. Отсюда концентрация P_x для полидисперсной матовой добавки будет определяться из выражения

$$P_x = P \left[\frac{S_1}{1 - \frac{U_1 \cdot t_x}{H}} + \frac{S_2}{1 - \frac{U_2 \cdot t_x}{H}} \right], \quad (10)$$

где U_1 и U_2 – скорости оседания частиц матовой добавки соответственно крупной и промежуточной фракции.

При подстановке в (10) значений скоростей оседания частиц матовой добавки соответственно крупной и промежуточной фракции были получены уравнения концентрации матовой добавки по глубине сосудов при длительном хранении лаков УР-2104, МЛ-2111 и НЦ-243. Результаты вычислений приведены на рисунке 3.

В емкостях для хранения лака крупные частицы матовой добавки, при вычисленных скоростях оседания, практически осядут на дно сосудов за 36,9 суток (лак УР-2104); за 48,54 суток (лак МЛ-2111) и за 27,04 суток (лак НЦ-243).

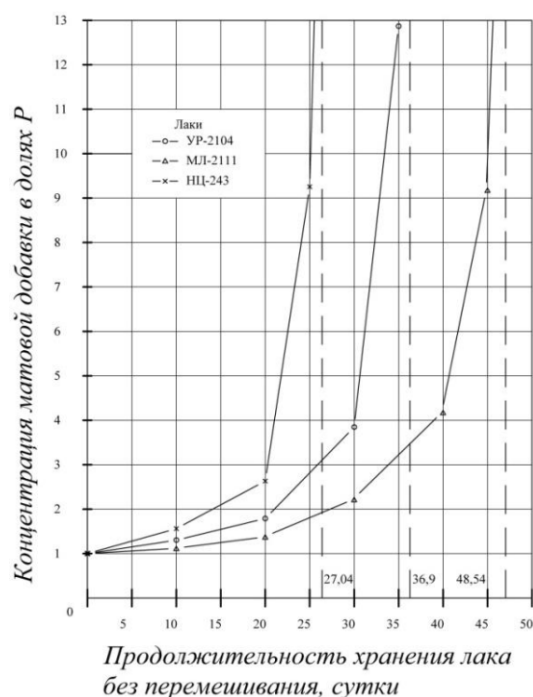


Рис. 3. Зависимость концентрации матовой добавки в объеме раствора лака, исключаящем по глубине слой, в котором произошло оседание частиц, от продолжительности хранения лака без перемешивания

Скорость оседания промежуточной фракции частиц матовой добавки очень мала. Это обстоятельство позволяет рассматривать влияние седиментации только для крупной фракции частиц матовой добавки на изменение концентрации ее в объеме раствора лака. При продолжительности хранения лаков без перемешивания, исчисляемая сутками доля, вносимая промежуточной фракцией частиц матовой добавки на изменение ее концентрации, остается мало изменяемой.

Как видно из рисунка 3 при седиментации крупной фракции частиц в течение 10 суток не требуется интенсивное перемешивание всего объема раствора лаков. При дальнейшем хранении лаков без перемешивания происходит значительное расслоение матовой добавки в рассматриваемых лаковых композициях. Так через 20 суток оседание частиц матовой добавки приводит к увеличению ее концентрации в нижележащих слоях примерно равной двойному зна-

чению от начальной концентрации. При дальнейшем хранении лаков без перемешивания практически полностью оседают частицы крупной фракции на дно емкостей.

Выводы

Перед применением в производстве лаковых композиций, содержащих матовую добавку, возникает неотложная необходимость в интенсивном перемешивании их растворов для равномерного распределения частиц матовой добавки по всему объему емкостей, в которых они хранятся. При невыполнении этого технологического приема получаемые поверхности покрытия будут отличаться по степени матовости. Покрытия, образованные пробами лаков из верхних слоев емкостей, будут более блестящие, т.е. иметь меньшую высоту неровностей покрытия. Покрытия, образованные пробами лаков из нижних слоев емкостей, будут менее блестящие и у них, будет наблюдаться большая высота неровностей контролируемой поверхности.

Литература

1. Проектфирмы «Дегусса»: Дегусса– Mat-tier-undsmittelfürdieLackindustrie, RA 14-05-869H, Printed in Germany.
2. Наполнители для полимерных композиций материалов. Справочник пособие. Пер. с англ. Под ред. П.С. Бабаевского. М.: Химия, 1981. 736 с.
3. Матирующая добавка ТК-100 фирмы «Дегусса». Перевод ГИПИЛКП отдел НТИ. М. 1976. 10 с.
4. Прудников П.Г., Гольденберг Е.Э., Кордонская Б.К. Справочник по отделке мебели. Киев: Техника, 1982. 255 с.
5. Furnas C.C., Yud. a. End. Chem., 23, №9, 10502, Sept., 1931
6. Стокдейл Г.Н. Конспект доклада. Victoria Strehht. London. SW1. 01. 2225678. 1968. с. 10-18.
7. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. Для химико технологических специальностей вузов. Перераб. и доп. М.: Химия, 1975. 512 с.
8. Прокопович Б.В. Исследование процессов лаконолива при отделке древесины: Автореф. дис. канд. техн. наук. М. 1968. 18 с.
9. Степин Б.В. Применение Международной системы единиц физических величин в химии. Практическое пособие. М.: Высшая школа, 1990. 96 с.

10. Рыбин Б.М. Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов. Учебник для вузов. М.: МГУЛ, 2007. 268 с.

11. Буглай Б.М., Рыбин Б.М. О методах оценки блеска матированных покрытий. М.: деревообрабатывающая промышленность, 1981. №10. с. 2 – 5.

© **Б.М. Рыбин** - д-р техн. наук, профессор кафедры древесиноведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), rybin@mgul.ac.ru; **И.А. Завражнова** - доцент кафедры древесиноведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zavrazhnova@mgul.ac.ru; **Д.Б. Рыбин** - технолог ООО «Тимберланд», wood@yandex.ru.

Уважаемые авторы журнала!!!

Все подготовленные к изданию статьи, должны соответствовать всем требованиям к оформлению.

Статьи, представляющие результаты исследований, должны включать разделы: «Введение», «Методы и материалы», «Результаты», «Заключение», «Литература». Обзорные статьи также должны быть структурированы и состоять из разделов: «Введение», «Обзор исследований в области...», «Заключение», «Литература».

Рабочие языки журнала — русский и английский.

Макет журнала **двухколоночный**.

Параметры страницы: верх — 3 см; низ — 2,5 см; левое поле — 1,8 см; правое поле — 1,8 см; расстояние между колонками — 1,25 см.

Основной шрифт статьи «Times New Roman», размер шрифта — 11 кегль через 1 интервал (ключевые слова аннотации оформляются кеглем 10). Абзац — 0,75 см. Текст формируется в две колонки.

Размер рисунков: ширина — не более 17,5 см; высота — не более 12 см;

Название рисунков: шрифт «Arial» кеглем 8 полужирный, выравнивание по ширине (**Рис. 1. Название рисунка**)

Размер таблицы не должен превышать 17,5 х 12 см.

Название таблиц: шрифт «Arial» кеглем 8 полужирный, выравнивание по ширине (**Таблица 1 - Название таблицы**)

Формулы, представленные в статье, должны по размеру помещаться в одну колонку, то есть иметь размер не более чем 8,5 х 5 см (шрифт «Times New Roman»).

ООО « ВУДЛЕНД »

*извещает о проведении торгов (аукциона) в электронной форме
на право заключения договора купли – продажи имущества.*

Собственник имущества: ООО «ВУДЛЕНД».

Организатор: ООО ЭТП ГПБ <https://etp.gpb.ru/>

Контактный тел.: +7 (495) 719-23-79, +7 (495) 276-00-51.

Заявки на участие принимаются с 09.07.2018 г. 10:00 (МСК) по 08.08.2018г. 15:00 (МСК);

Дата проведения аукциона: 09.08.2018 г. до 11:00 (МСК);

Предмет продажи:

Комплексно производству прямолинейных клееных деревянных изделий, общ. площ. 41 902,6 кв.м.

Местонахождение: Московская область, г. Электросталь, ул. Горького, д.32

Начальная цена: 436 235 076,00 руб., в т.ч. НДС.

Химическая технология древесины

UDK 674.81

STUDY ON THE NECESSARY CHANNEL LENGTH OF PELLET MAKING MACHINES

Zoltán Kocsis, Etele Csanády

The mechanical properties of pellets produced under high pressure depend on an array of influencing factors. The most important influencing factors are the type of wood, particle size, moisture content, the compaction pressure, the pressing speed, the deformation holding time, the pellet diameter and the press temperature. Furthermore, the ratio of the channel diameter (D) and the channel length (L) has significant influence on the pellet density due to the wall friction which is sometimes referred to as the odometer theory. In the ring presses the counter pressure is ensured by wall friction forces which depend on the channel length. To our best knowledge this problem has not been treated yet in details and, therefore, a theoretical and experimental investigation was undertaken to derive a generally valid relationship so describe the above phenomenon. The obtained relationship in dimensionless form is suitable to determine the necessary channel length to given channel diameter for different pellet densities or required maximum pressure using chips of two wood species. The obtained results are in agreement with real channel diameter/length ratios used in the practice.

Keywords: pushing force, dimensionless number, wall friction, press channel length, deformation modulus, surface reduction factor

Механические свойства гранул, полученных под высоким давлением, зависят от множества влияющих факторов. Наиболее важными факторами воздействия являются тип древесины, размер частиц, содержание влаги, давление прессования, скорость прессования, время удержания деформации, диаметр гранул и температура пресса. Кроме того, отношение диаметра канала (D) и длины канала (L) оказывает значительное влияние на плотность гранул из-за трения стенки, которое иногда называют теорией одометра. В кольцевом прессе давление счетчика обеспечивается силами трения стенки, которые зависят от длины канала. Насколько нам известно, это проблема еще не обработана в деталях, и поэтому, чтобы описать вышеупомянутое явление, было проведено теоретическое и экспериментальное исследование, для получения общеприменимых соотношений. Полученная зависимость в безразмерном виде пригодна для определения необходимой длины канала к заданному диаметру канала, при различных плотностях гранул, или требуемого максимального давления с использованием стружки двух древесных пород. Полученные результаты согласуются с используемыми в практике реальными соотношениями диаметр/длина канала.

Ключевые слова: сила нажатия, безразмерное число, трение стенки, длина канала пресса, модуль деформации, коэффициент уменьшения поверхности

Introduction

In a previous article (Kocsis and Csanády, 2018) the main research results and relationships were presented on the mechanics and energy requirement of the wood chip pelleting process. Based on the extensive research work and theoretical considerations, generalized relationships in dimensionless form were elaborated for practical uses. Using die-ring pelleting machines, where the loose chip material is compressed by a roller and pressed into the boreholes of the ring, a common problem is the not proper selection of the borehole diameter and length ratio for a given wood chip. Various wood species may have quite different physical properties influencing the friction coefficient between channel wall and the pressed materi-

al, and also the side pressure in the channel. As a consequence, a given die-ring can produce different pellet densities depending on the chip properties. In the practice, the pellets manufacturers may incorrectly select the die-ring process parameters (wood species, particle size distribution, moisture content, temperature and the required compression pressure). Therefore the result may be a low quality product or increased energy consumption. The compaction process in press channel is a very complicated one due to the varying conditions along the press channel. The modulus of elasticity, the Poisson's ratio and the friction coefficient on the wall are continuously varying along the length of the channel which make a pure theoretical treatment impossible. In the following the brief discussion of

the problem is given which facilitates the proper processing of experimental results and to get useful relationship for practical purposes.

Theoretical considerations

The compaction of bulk particle materials is a highly non-linear viscoelastic plastic process during which the density and the modulus of elasticity rapidly increase. Due to the wall friction, the pressure along the length of press channel is not constant, Poisson's ratio and friction coefficient also vary as a function of length (Biot, 1954; Findley *et al.*, 1976; Heiko *et al.*, 2005; Hofko, 2006). Concerning the main influencing factors, the length/diameter ratio (L/D) plays a distinct role determining the influence of wall friction on the density distribution in the compaction channel. The pressure distribution in the space before a compressing piston can be given by the following equation (Sacht, 1967; Sitkei, 1981).

$$p_x = p_0 e^{-kx} \quad (1)$$

where:

p_0 —pressure exerted by the piston, Nmm⁻²;

p_x — pressure at a distance x from the piston, Nmm⁻².
and

$$k = \frac{4}{D} \mu \frac{\nu}{1-\nu}$$

with

μ — friction coefficient;

ν —Poisson's ratio (0.35-0.45).

The constant k in Eq. (1) is affected by the ratio of the wall surface area (F_{wall}) to the volume (V) which is

$$k' = \frac{F_{wall}}{V} = \frac{D \cdot \pi \cdot L}{\frac{D^2 \pi}{4} \cdot L} = \frac{4}{D}$$

In our experiments piston diameters of 6, 8 and 16 mm have been used. Taking the average values for $\mu=0.6$ and $\nu=0.4$, the constant k has values of 2.67, 2 and 1 mm⁻¹ respectively. With decreasing k -values the pressure distribution will be more uniform in the press channel. The Poisson's ratio generally slightly increases with higher pressures. In the pellet range values of 0.4 and 0.45 are appropriate. The friction coefficient is influenced by the wood species, moisture content and pressure. An interesting observation was for agricultural materials that, applying high pressure, the water might

be pressed out from the material reducing the friction coefficient considerably. The condition for water release is that the loading pressure is greater than the water potential (tension) of the material at given moisture content. In the experiments an average moisture content of 10% was used. It corresponds, using the sorption isotherm and converted to a pF -number of 6 or 1000 bar tension. The maximum compression pressure was 1400 bar that some water is released and pressed out to the boundary of the particles (Kocsis and Csanády, 2016).

Materials and methods

In these experiments the same Spruce (*Picea abies*) and Black locust (*Robinia pseudoacacia*) wood species were used as described in our previous article (Kocsis and Csanády, 2018). The push-out forces were measured for the different pellet diameters, wood species, and compaction end pressures. Further important measurement was to determine the radial increment of pellet diameters (rebound) after unloading which are responsible for the side pressure in the channel wall.

An approximate modeling of the pushing force

As outlined above, the force required for pushing out the pellet from the channel is originated from the side wall friction. This force formally can simply be calculated by the following equation:

$$F_p = A \cdot p_w \cdot \mu \quad (2)$$

where:

A — instantaneous contact area of the pellet with the channel wall, mm²;

p_w — average side pressure, Nmm⁻²;

μ — friction coefficient.

The side pressure is developed by the stored elastic deformation of the material in the compressed state, the determination of which is the main problem.

Fig. 2 shows the variation of pushing force determined experimentally as a function of displacement for pellets of 25 mm length. Black locust requires somewhat higher force compared to the Spruce. It is interesting to note that pellets with different diameters required practically the same force. Another important observation that the force varied nearly linearly as a function of displacement. Therefore as a first approximation, in the following we calculate with a linear force function along the pellet length. The bottom end of the pellet leaving the channel will undergo an unloading process due

to the free expanded part of the pellet (end effect in Fig. 2). For the sake of simplicity this effect will be taken into account with the assumption that the radial stress decreases, starting from the bottom edge of the channel, under 45° to its stationary value (Timoshenko and Woinowsky-Krieger, 1957).

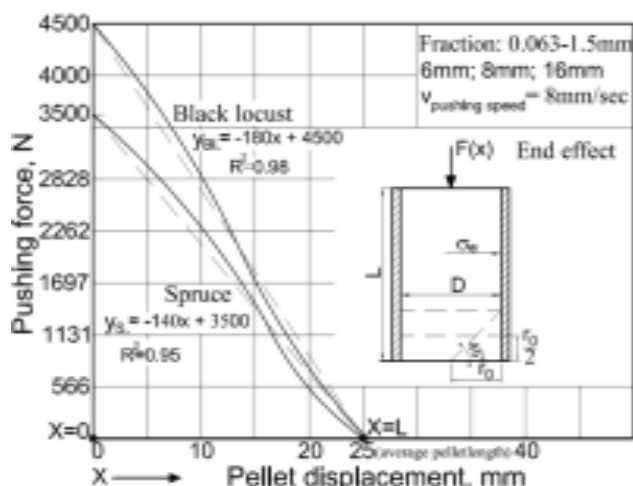


Fig. 2. The reduction of maximum pushing force as a function of free pellet length

It is interesting to compare the maximum pushing force with the maximum compaction force F_c (1400 bar maximum pressure) for different pellet diameters and wood species ($F_p = 3500$ N and 4500 N for Spruce and Black locust respectively). These F_p/F_c values are summarized in Table 1.

Table 1 - F_p/F_c force ratios for the investigated pellets in per cent

	Φ 6 mm	Φ 8 mm	Φ 16 mm
Spruce	88 %	50 %	12 %
Black locust	114 %	64 %	16 %

It is clearly seen that with increasing pellet diameters the share of the push out energy in the total energy of pelleting sharply decreases. During the push-out of a pellet the contact area in Eq. (2) varies according to the following equation:

$$A_x = D\pi(L_{\text{pellet}} - x) \quad (3)$$

where:

x – length of the pellet out of the channel, mm.

The instantaneous pushing force is

$$F_{(px)} = A_x \sigma_e \mu \quad (4)$$

where:

σ_e – stress due to the stored elastic deformation (lateral pressure), Nmm^{-2} .

This stress is related to the elastic recovery of the pellet in the following manner

$$\sigma_e = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\Delta r}{r_0} \quad (5)$$

where:

Δr – increment of pellet radius due to elastic recovery, mm;

r_0 – channel radius, mm;

E – stored true modulus of elasticity (do not confuse with the deformation modulus of the pellet in compressed state), Nmm^{-2} .

As it is mentioned above, at the lowest end of the channel the stress σ_e declines (end effect) and this effect may be taken into account with the proper correction of the contact surface (see Fig. 2). The ratio of the effective area to the geometric contact area (surface reduction factor) is given by

$$\psi_{\text{end}} = \frac{D\pi(L_{\text{pellet}} - r_0/2)}{D\pi \cdot L} = \frac{L_{\text{pellet}} - r_0/2}{L} \quad (6)$$

L_{pellet} – pellet length, mm.

Keeping in mind the above equations, the instantaneous pushing force is

$$F_{(x)} = 2\pi \frac{E}{1-\nu} \mu \Delta r L_{\text{pellet}} \psi_{\text{end}} \quad (7)$$

After pushing out the pellets, their diameters were measured. Because the increment Δr has generally values in the range of tenth of mm, a very accurate measurement is difficult. Average values obtained are summarized in Table 2 for both wood species and for different pellet diameters.

Table 2 - Increment of pellet diameters, Δr

	Φ 6 mm	Φ 8 mm	Φ 16 mm
Spruce	0.25 mm	0.3 mm	0.52 mm
Black locust	0.245 mm	0.3 mm	0.51 mm

Based on our measurements, no significant difference could have been established between the two wood species. Sadly, friction coefficients for wood chips under high pressure conditions are not available at all. The obtained functional relationship (Eq. 7) does not allow separating the effect of friction and lateral pressure on the pushing force. Nevertheless, a good estimate can be done in the following manner.

We possess detailed experimental results on friction properties of wood species for different particle size distributions and surfaces (Varga, 1983). Under low pressure conditions the appropri-

ate values are $\mu = 0.65$ and $\mu = 0.55$ for Spruce and Black locust respectively. If we do not change these values for high pressure conditions then the true modulus of elasticity of the compressed pellet can be calculated. Knowing the pushing force, Eq. (7) is suitable to calculate $E/1-\nu$ values for different pellet diameters. They are summarized in Table 3.

Table 3 - Elastic module $E/1-\nu$ in the compressed pellet

	Φ 6 mm	Φ 8 mm	Φ 16 mm
Spruce	146 Nmm ⁻²	124.2 Nmm ⁻²	78.5 Nmm ⁻²
Black locust	221 Nmm ⁻²	188.7 Nmm ⁻²	119 Nmm ⁻²

It is probably that the friction coefficient under high pressure conditions is somewhat less than the above figures. In this case the elastic moduli will be higher in the same ratio as the friction coefficients were lowered.

The actual deformation modulus of the pellet is naturally much higher. For comparison, an estimate can be done very easy. Using the nonlinear compaction equation (Sitkei, 1981), for Spruce chip compaction ($D = 6$ mm; $p_c = 1400$ bar; $\varepsilon = 0.8$) the following equation is valid:

$$p_c = A \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^n \quad (8)$$

where:

$$A = 8.75 \text{ Nmm}^{-2} \text{ and } n=2$$

Derivation of this equation gives the deformation modulus in the form:

$$E_d = \frac{\partial p_c}{\partial \varepsilon} = A \cdot n \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^{n-1} / (1-\varepsilon)^2 \quad (9)$$

Substituting the appropriate values, we get $E_d = 1750 \text{ Nmm}^{-2}$ which is one magnitude higher than the true elastic modulus in the compressed pellet. Using Black locust chips, the required strain is somewhat less ($\varepsilon = 0.75$) and the deformation modulus is $E_d = 1590 \text{ Nmm}^{-2}$. The difference in the deformation may be explained by the difference in hardness of the individual particles.

Determination of channel length for a given pressure

Using die-ring pelleting machines with continuous operation, the prescribed maximum compaction pressure (or force) is in equilibrium with friction forces acting on the channel surface. Using Eq. (7), the equilibrium equation has the form ($x = 0$):

$$p_c = \frac{F_c}{r_0^2 \pi} = \frac{2}{r_0} \frac{E}{1-\nu} \mu \frac{\Delta r}{r_0} L \psi_{end} \quad (10)$$

It seems to be advisable to transform the above equation into a dimensionless form:

$$\frac{L}{D} = \frac{p_c}{4 \mu \psi_{end} \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{\Delta r}{r_0}} \quad (11)$$

where:

$D = 2r_0$ – diameter of the channel, mm;

L – channel length, mm;

E – true modulus of elasticity in the compressed pellet, Nmm⁻².

Using the measurements results with the three channel diameters, the functional relationship between diameter and channel length is shown in Fig. 3, both for Spruce and Black locust, and for $p_c = 1400$ bar.

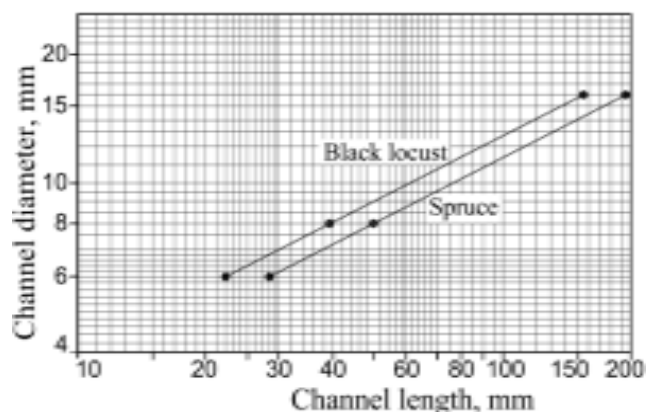


Fig. 3. Relationship between channel diameters and channel length ensuring the required compression pressure

It can be stated that Spruce chip, for the same compaction pressure, requires slightly longer channel compared to Black locust. Therefore using a given die-ring, different compaction pressures may be obtained if chip composition varies. The more generally valid dimensionless plot of experimental results is given in Fig. 4, which is a direct proof of the validity of Eq. (11).

Obviously, for other wood species and chip particle distributions the experimental determination of E and Δr values is necessary.

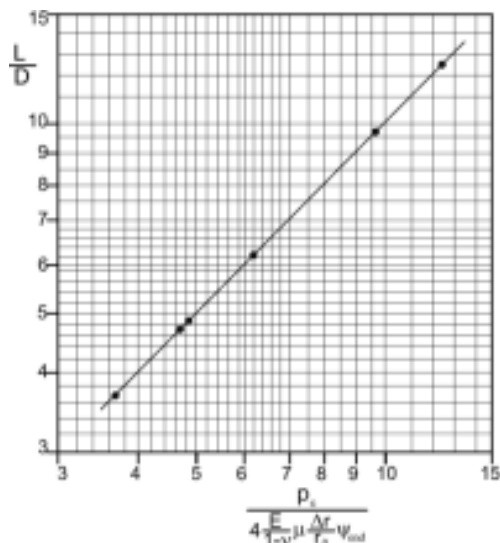


Fig. 4. Representation of Eq. (11) based on experimental results

Conclusions

Based on theoretical and experimental investigation the following main conclusions may be drawn:

- The length and diameter ratio of the press channel considerably influences the stress distribution in the pellet.
- In pellet making a considerable energy is spent on the pushing out of compressed pellet from the channel. In order to determine the main relationships of this process a new model is developed.
- Using the experimental results with two different wood chips, the elastic recovery and the corresponding true modulus of elasticity were determined for several pellet diameters. This true modulus of elasticity is responsible for the lateral pressure on the channel wall and the associated friction forces.
- The maximum compaction pressure is in equilibrium with the friction forces acting on the channel surface. A dimensionless relationship is developed to determine the necessary channel length for a given compaction pressure and pellet diameter.
- The chip mechanical properties may considerably influence the appropriate channel length to ensure the required pressure and pellet quality.

References

1. Biot, M.A., (1954): Theory of stress-strain relations in anisotropic viscoelasticity and relaxation phenomena. *Journal of Applied Physics*. 25(11):1385-1391.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.1721573>
2. Findley, W.N.; Lai, J.S.; Onaran, K., (1976): *Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials with an Introduction to Linear Viscoelasticity*. Dover Publication, Inc., Mineola, New York. S.55-74.
3. Heiko, T.; Clovis, R.H.; Philip, E.H., (2005): Modelling the physical processes relevant during hot pressing of wood-based composites. Part II. *Rheology*. 64(2):125–133.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00107-005-0032-5>
4. Hofko, B., (2006): „Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalten“; Betreuer/in(nen): R. Blab, K. Kappl; Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, 2006; Abschlussprüfung: 24.11.2006.
5. Kocsis, Z.; Csanády, E., (2016): Factors influencing the mechanical stability of wood pellets. *Wood Research* 61(3):487-494.
6. Kocsis, Z.; Csanády, E., (2018): Studies on the pelleting of wood based materials. *DEREVOBRABATYVAYUSHCHAYA PROMYSHLENNOST* 2018(1):42-50.
7. Sacht, H.O., (1967): Über den Verdichtungsvorgang bei landwirtschaftlichen Halmgütern und die dabei auftretende Wandreibung. *Grundl. Landtechn.* 17(2):47-52.
8. Sitkei, Gy., (1981): A mezőgazdasági anyagok mechanikája. [Mechanics of Agricultural Materials]. Akadémiai Kiadó, Budapest, pp.126-419. (in Hungarian).
9. Timoshenko, S.; Woinowsky-Krieger, S., (1957): *Theory of Plates and Shells*. McGRAW-HILL Company. S.37-143.
- Varga, M., (1983): *Por-forgács halmazok mechanikai tulajdonságai, különös tekintettel a tartályból való kifolyásra*. [Mechanical properties of bulk wood chips]. Ph.D. dissertation, Hungary, Sopron, pp.74-144. (in Hungarian).

УДК 676.1.062

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА СУШКИ НА СТРУКТУРУ И ГИДРОФИЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НЕБЕЛЕННОЙ СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ МАРКИ ЭК-1

Н.Ф. Тимербаев, К.Х. Гильфанов, Г.Ш. Гогелашвили, В.И. Таланцев

Исследованы процессы конвективной, контактной и диэлектрической сушки целлюлозы марки ЭК-1. Наименьшее влияние на изменение структуры сушимого материала оказывает конвективная сушка. Диэлектрический способ сушки целлюлозы позволяет значительно интенсифицировать процесс при улучшении качества сушимого материала. Исследования показали, что диэлектрическую сушку целесообразно применять при влагосодержании образца менее 30%. В ходе исследований определен оптимальный режим диэлектрической сушки, позволяющий получать материал с высокой плотностью и соответствующей удельной поверхностью, оказывающих наибольшее влияние на получение материалов с высокими электроизоляционными свойствами.

Ключевые слова: целлюлоза, протонный магнитный резонанс, времена релаксации, диэлектрическая сушка

The processes of convective, contact and dielectric drying of cellulose of the brand EK-1 were studied. Convective drying has the least effect on the change in the structure of the drying material. The dielectric method of drying cellulose allows to significantly intensify the process while improving the quality of the dried material. Studies have shown that dielectric drying is advisable to apply with a moisture content of the sample of less than 30%. In the course of the research, an optimal dielectric drying regime has been determined, which makes it possible to obtain a material with a high density and a corresponding specific surface area, which have the greatest effect on obtaining materials with high electrical insulating properties

Keywords: cellulose, proton magnetic resonance, relaxation times, dielectric drying

Введение

Среди большого разнообразия физико-химических процессов, связанных с переработкой растительного сырья сушка материалов на основе целлюлозы представляет большой практический и научный интерес. Как известно [1, 2], указанный процесс сопровождается изменением форм связи воды с целлюлозой и происходящими в ней структурными изменениями.

Среди известных способов сушки наибольшее распространение получили конвективная, контактная, сушка в поле токов высокой частоты, комбинированные способы сушки, включающие одновременное применение вышеуказанных способов [3,4,5].

В последнее время для анализа влияния различных способов теплового воздействия на структуру целлюлозы и формы связанной с ней воды широкое применение получили высокочувствительные методы протонного магнитного резонанса [6-13], которые в сочетании с данными, полученными при термодинамическом анализе изотерм адсорбции и десорбции, позволяют получать весьма интересные результаты для прогнозирования структуры и свойства материалов на основе целлюлозы на стадии тепловой обработки в ходе технологического процесса.

Механизм тепловой десорбции воды, связанной с волокнами целлюлозы, лучше всего изучать на основе современных представлений о слоистой организации структуры ее микрофибрилл, образующихся в процессах биосинтеза растительной клетки [14-19]. Следует иметь при этом в виду, что элементарные фибриллы, являющиеся составными частями микрофибрилл, формируются в ходе биосинтеза при прохождении глюкозных единиц через синтазные, чаще всего шестирозеточные, терминальные комплексы [16-20].

Как было показано в работах [7, 8, 21, 22] пространство между элементарными фибриллами носит щелевидный микропористый характер с квазипараллельными гидрофильными стенками, принадлежащими соседним элементарным фибриллам. Гидрофильность обусловлена наличием активных центров, которые являются гидроксильными группами, обеспечивающими водородную связь с адсорбирующимися молекулами воды. В местах сужения указанных пор адсорбционный потенциал, создаваемый этими центрами, особенно велик, что создает определенные препятствия в процессе термического удаления воды из целлюлозных материалов.

На способность целлюлозы связывать воду существенное влияние оказывают способы и режимы ее сушки [2, 3]. При этом важная роль принадлежит необратимым явлениям типа ороговения и деструкции, имеющими место обычно в периоде падающей скорости сушки целлюлозных материалов [1, 2, 4]

Материалы и методы

Для исследования была использована сульфатная небеленая целлюлоза марки ЭК-1 производственной выработки по ГОСТ 12765-78 с начальной влажностью 43-45% со степенями помола 27°ШР, 45°ШР, 68°ШР.

Образцы целлюлозы подвергались сушке тремя способами: конвективным, контактным, диэлектрическим. Температурный режим для указанных видов сушки был примерно одинаковым: $+100^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Конвективную и контактную сушку выполняли в соответствии с рекомендациями [23].

Для проведения опытов по диэлектрической сушке была сконструирована установка, состоящая из генератора высокой частоты с регулируемой мощностью до 4 кВт и рабочей частотой 1,65 МГц, рабочего конденсатора размером 250х250 мм с регулируемым зазором и с тензодатчиком, регистрирующим давление пластин конденсатора на образец, блока питания и измерительной аппаратуры.

При реализации диэлектрической сушки целлюлозных материалов под давлением целлюлозный материал помещался между пластинами, выполненными из термореактивной пластмассы и зажимался пластинами рабочего конденсатора с нужным давлением.

Плотность материалов определялась весовым методом. Взвешивание образцов производилось на аналитических весах «VibraHT/HTR-120E» (ShinkoDensy, Japan, 2008) с точностью $\pm 0,0002$ г.

Измерения параметров образцов при разной стадии их сушки производилось после предварительного охлаждения до $+22^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ и выдержки в термостате для достижения их равномерного влагосодержания в герметичном состоянии в течение трех суток.

Для определения форм связи воды в целлюлозе использовался импульсный метод ЯМР- ^1H релаксации [2].

Измерения ЯМР- ^1H релаксационных параметров целлюлозы выполняли на релаксметре «Spin Track» [24] с рабочей частотой 20 МГц. Регистрировать спад свободной индукции уда-

валось с периодом нечувствительности приемного тракта менее 8 мкс, что оказалось очень важным для анализа сигналов от полисахаридов с временами спин-спиновой релаксации, не превышающими 20 мкс.

Спады свободной индукции измеряли как отклики спиновой системы на одиночный импульс 90° длительностью 1,8 мкс. Поскольку спады свободной индукции использовали и для анализа формы временного спада, и для преобразования в спектральную линию, то измерения проводили на частоте, отличной от резонансной на 100 кГц, с целью минимизации помех. Время регистрации спада свободной индукции составляло 2 мс с шагом выборки отсчетов квадратурного сигнала в 0,2 мкс, количество накоплений составляло 100, время повторения сканов при накоплении сигнала 1 с.

Для образцов целлюлозы влажностью до 5% снимали спады свободной индукции и спинового эха, а для более влажных образцов ($>5\%$) применяли последовательность Карра–Парселла–Мейбума–Гилла (CPMG) [25]. Длительность импульса 90° указана выше, длительность импульса 180° составляла 3,6 мкс.

Активную к адсорбции воды удельную поверхность целлюлозы определяли по формуле $S_{\text{уд}} = 3500w_m(\text{м}^2/\text{г})$ (1) [9].

Результаты

На рисунке 1 и 2 представлены зависимости времени релаксации T_2 и первой производной T_2 по $w dT_2/dw$ от влагосодержания в процессе сушки целлюлозы тремя способами: конвективным, контактным и диэлектрическим. Из графиков видно, что зависимость $T_2=f(w)$ и $\eta=f(w)$ для каждого из этих способов сушки практически не отличаются, за исключением участков, соответствующих очень малым влагосодержаниям до 5,8%. Сходство этих кривых свидетельствует об аналогичном характере удаления влаги, пока в процессе сушки целлюлоза является обычным капиллярно-пористым телом.

В работе [2, 6, 7, 9] было показано, что емкость монослоя целлюлозы определенная методом графического дифференцирования зависимости $T_2=f(w)$ (dT_2/dw как функция от влагосодержания) дает хорошо согласующиеся (совпадающие) результаты с данными, полученными при решении уравнения БЭТ на основании экспериментально полученных изотерм десорбции воды из целлюлозы.

Область до 29% на кривых $T_2=f(w)$ и $\eta=f(w)$ характерна для удаления свободной влаги из

макропор. Известно, что в этой области макропоры имеют радиус более 10^{-7} м (Дубинин). Диапазон влагосодержаний от 29% до 15,5% соответствует испарению влаги капиллярной конденсации, причем критическая точка 29% соответствует максимальному гигроскопическому влагосодержанию образца. Излом в области 15,5% на кривых $T_2=f(w)$ соответствует началу испарения влаги в состоянии полимолекулярной адсорбции, так как подвижность молекул воды в данной области влагосодержаний заметно уменьшается из-за влияния стенок межмикрофибриллярных пор. Следовательно, основной вклад в релаксацию начинает вносить вращательная подвижность молекул воды. Отсутствие четко выраженной точки излома на обсуждаемой графической зависимости в области 15% объясняется сравнительно быстрым обменным взаимодействием молекул воды [2].

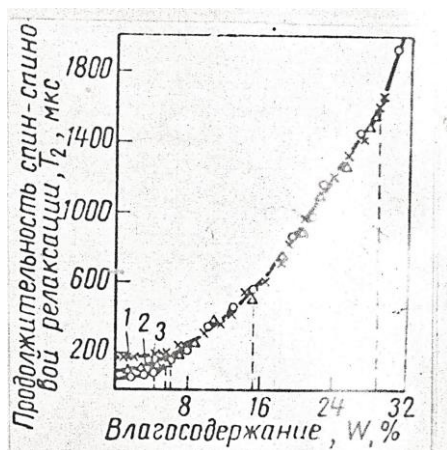


Рис. 1. Зависимость времени спин-спиновой релаксации T_2 от влагосодержания w небеленой сульфатной целлюлозы марки ЭК-1, подвергнутой различным способам сушки: 1 – конвективной; 2 – контактной; 3 – диэлектрической.

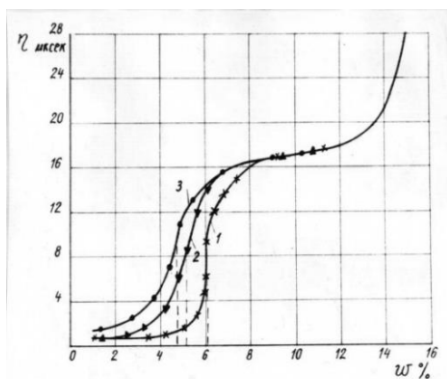


Рис. 2. Зависимость η от влагосодержания w небеленой сульфатной целлюлозы марки ЭК-1, подвергнутой различным способам сушки: 1 – конвективной; 2 – контактной; 3 – диэлектрической.

Характерные точки на кривых рисунке 2 свидетельствуют о том, что в области 4,8-6% влагосодержаний наблюдается переход к удалению влаги, находящейся в состоянии мономолекулярной адсорбции. В этой области подвижность молекул воды, у которых резонируют ядра протонов, весьма мала, что выражается в заметном уменьшении времен релаксации.

При уменьшении влаги в рассматриваемом состоянии наблюдается некоторое различие в поведении $T_2=f(w)$ и $\eta=f(w)$ в результате действия того или иного вида сушки. Экспериментально обнаруженное нами возрастание интенсивности удаления влаги при диэлектрической сушке обусловлено тем, что в отличие от других ее видов в общий поток удаляемой влаги вносит вклад не только градиенты влагосодержания и давления, но и градиент температуры и электродиффузионный потенциал.

Необратимые явления при сушке целлюлозных материалов имеют место, главным образом, в процессе удаления связанной влаги. В связи с этим целесообразно особо рассмотреть вопрос о влиянии режима диэлектрического способа сушки на характер изменения некоторых свойств исходной целлюлозы ЭК-1, вызванных необратимыми явлениями.

В начальной стадии процесса удалялась свободная влага (до 30-35% общего влагосодержания). Для этой цели создавался воздушный зазор между образцом целлюлозы и верхней горячей пластиной конденсатора. При включении диэлектрического нагрева происходит термовлагодиффузия из глубин целлюлозы и ее открытой поверхности [2]. Далее, предварительно обезвоженный до определенного влагосодержания образец целлюлозы подвергался диэлектрической сушке в напряженном состоянии, обусловленном давлением пластин конденсатора на сушимый материал. При этом измерялась температура образца, его влажность и плотность.

Данные снимались при фиксированных температурах. Результаты экспериментов сведены в таблицы 2, 3, 4. Из этих таблиц видно, что с увеличением степени помола растут влагоудерживающие свойства целлюлозы ЭК-1. Об этом свидетельствует увеличением времени сушки образцов до состояния, близкого к абсолютно сухому.

В процессе размола увеличивается активная удельная поверхность целлюлозы, связывающая воду, поэтому с ростом степени помола растет и содержание связанной влаги. В пользу

этого говорят измеренные нами с помощью ЯМР значения мономолекулярной сорбции для целлюлоз со степенями помола 27°, 45°, 68° ШР. С помощью формулы (1) [9] были рассчитаны значения их удельных поверхностей. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1- Значения удельных поверхностей целлюлозы.

Степень помола Целлюлозы ЭК-1, °ШР	Удельная поверхность, м ² /г
27	113,5
45	144,3
68	196,0

Таблица 2 - Зависимость плотности целлюлозы ЭК-1от режима диэлектрической сушки и степени помола исходной массы. Высокочастотное напряжение, 0,1...0,5 кВ. Частота радиоизлучения, 1,65 МГц.

Степень помола, ШР	Давление, кПа	Продолжительность сушки, мин	Плотность образца, г/см ³
27	100	35	0,91
	250		1,01
	500		1,05
45	100	40	1,02
	250		1,07
	500		1,10
68	100	48	1,08
	250		1,09
	500		1,12

Примечание: температура прессования около +40°С; начальное влагосодержание 32%; конечное влагосодержание 1-4%.

Таблица 3 - Зависимость плотности целлюлозы ЭК-1 от режима диэлектрической сушки и степени помола исходной массы. Высокочастотное напряжение, 0,5...0,7 кВ. Частота радиоизлучения, 1,65 МГц.

Степень помола, ШР	Давление, кПа	Продолжительность сушки, мин	Плотность образца, г/см ³
27	100	28	0,96
	250		1,08
	500		1,11
45	100	32	1,03
	250		1,12
	500		1,15
68	100	37	1,10
	250		1,14
	500		1,19

Примечание: температура образца около +80°С; начальное влагосодержание 30%; конечное влагосодержание 1-4%.

Из таблиц также следует, что рост степени помола сопровождается увеличением плотности целлюлозных материалов, подвергнутых диэлектрической сушке в напряженном состоянии. Следует отметить, что абсолютная влажность

В процессе сушки материала, когда удаляется сорбированная вода, происходит взаимодействие между фрагментами соседних макромолекул целлюлозы с помощью освобождающихся от воды водородных связей. Как следует из представленных данных, рассматриваемый процесс сопровождается увеличением полной удельной поверхности за счет уменьшения макропористости. Определенную роль при этом играют гемицеллюлозы, обволакивающие целлюлозные цепи и выполняющие функции цементирующего агента. Этот процесс ведет к увеличению плотности целлюлозного материала, что хорошо просматривается в представленных таблицах 2, 3, 4.

ность образцов до сушки не превышала 32%. В конце сушки она была не более 3,5%.

Таблица 4 - Зависимость плотности целлюлозы ЭК-1 от режима диэлектрической сушки и степени помола исходной массы. Высокочастотное напряжение, 0,7...2,0 кВ. Частота радиоизлучения, 1,65 МГц.

Степень помола, ШР	Давление, кПа	Продолжительность сушки, мин	Плотность образца, г/см ³
27	100	15	1,09
	250		1,12
	500		1,14
45	100	18	1,13
	250		1,17
	500		1,26
68	100	23	1,22
	250		1,28
	500		1,32

Примечание: температура образца около +125°С; начальное влагосодержание 30%; конечное влагосодержание 1-4%.

Обращаясь вновь к рисункам 1 и 2 отметим, что некоторые различия в указанных на рисунке влагосодержаниях, соответствующих мономолекулярно-сорбированному состоянию,

при названных выше способах сушки объясняется влиянием способов сушки на структуру целлюлозы. При этом наибольшее влияние на вариацию структуру оказывает диэлектрический способ сушки в напряженном состоянии.

Межволоконное взаимодействие в ходе диэлектрической сушки проявляется интенсивнее, чем при конвективном способе сушки. Большую роль играют в этом процессе и усадочные явления в сушеном материале.

Заключение

1. Установлены оптимальный режим работы установки для диэлектрической сушки, позволяющая получать материал с высокой плотностью и соответствующей удельной поверхностью, оказывающих наибольшее влияние на получение материалов с высокими электроизоляционными свойствами.

2. Методом ЯМР исследовано влияние различных способов сушки на характер структурирования целлюлозных материалов.

3. Установлено, что времена поперечной релаксации протонов системы «целлюлоза – вода» зависят от способа удаления прочносвязанной воды.

4. Большее влияние на изменение структуры целлюлозы оказывает диэлектрическая сушка, меньшее – конвективная.

5. Экспериментально выбраны оптимальные режимы комбинирования сушки целлюлозы ЭК-1 (степень помола, удельное давление, высокочастотное напряжение, продолжительность сушки при частоте электромагнитного излучения 1,65 МГц) для получения максимальной плотности целлюлозного материала.

Литература

1. Фляте Д.М. Свойства бумаги. Изд. 3-е, переработанное и дополненное. — М.: Лесн. пром-сть, 1986. — 680 с.
2. Грунин Ю.Б. Анализ системы целлюлоза–вода модифицированными методами протонного магнитного резонанса. Дис. ... д-ра хим. наук. Рига: ИХД АН Латвии. 1989. 448 с.
3. Лыков В.Л. Сушка в химической промышленности. — М.: Химия, 1970. — 432 с.
4. Фляте Д.М. Технология бумаги. М.: Лесн. пром-ть, 1988. — 440 с.
5. Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы. Том 2. Производство сульфатной целлюлозы. Учебное пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. — Москва, Лесная промышленность, 1990. — 600 с.

6. Grunin Y.B., Grunin L.Y., Nikol'skaya E.A., Talantsev V.I. Microstructure of cellulose: NMR relaxation study. *Polymer Science. Series A*. 2012. T. 54. № 3. С. 201-208.

7. Grunin, L.Yu. Features of the structural organization and sorption properties of cellulose / L.Yu. Grunin, Y.B. Grunin, E.A. Nikolskaya, V.I. Talantsev, D.S. Masas et. al. // *Polymer Science Series A*, 2015. — Vol. 57, Iss. 1. — P.43-51.

8. Грунин, Ю.Б. Надмолекулярные перестройки в целлюлозе в ходе гидратации / Ю.Б. Грунин, Л.Ю. Грунин, В.И. Таланцев, Е.А. Никольская, Д.С. Масас // *Биофизика*, 2015. — Т. 60, Вып. 1. — С. 53-64.

9. Yu.B. Grunin, L.Yu. Grunin, E.A. Nikol'skaya, V.I. Talantsev, and G.Sh. Gogelashvili. Features of the Sorption of Water Vapor and Nitrogen on Cellulose. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. Vol. 87, No. 1, 2013. P.100-103.

10. Levitin, S.V. Supramolecular Structure of Chitosan Acid-Hydrolysis Products / S.V. Levitin, L.S. Gal'braikh, Yu.B. Grunin, D.S. Masas // *Fibre Chemistry*, 2014. — Vol. 46, Iss. 3. — P.147-150.

11. Никольская Е.А., Грунин Л.Ю., Грунин Ю.Б., Hiltunen Y. Принцип прямого определения влагосодержания целлюлозы на основе ¹H-ЯМР-релаксометрии. *Аналитика и контроль*. 2013. Т. 17. № 2. С. 153-158.

12. Leisen J, Beckham H W, Sharaf M A. Evolution of crystallinity, chain mobility, and crystallite size during polymer crystallization // *Macromolecules*. 2004. V. 37 (21): 8028-8034.

13. Taylor, R.E., French, A.D., Gamble, G.R., Himmelsbach, D.S., Stipanovic, R.D., Thibodeaux, D.P., Wakelyn, P.J., Dybowski, C. ¹H and ¹³C Solid-state NMR of *Gossypium barbadense* (Pima) Cotton. // *Journal of Molecular Structure*. V. 878 Number 1. 2008. P. 177-184.

14. Brown R.M. Cellulose Structure and Biosynthesis: What is in Store for the 21-st Century? *Journal of Polymer Science. Part A Polymer Chemistry*. 2004. V.42. P.487-495.

15. Carpita N.C. Update on Mechanisms of Plant Cell Wall Biosynthesis: How Plants Make Cellulose and Other (1→4)-β-d-Glycans. *Plant Physiology*. 2011. Vol.155. №1. P.171-184.

16. Nishiyama Y., Langan P., Chanzy H. Crystal Structure and Hydrogen-Bonding System in Cellulose Iβ from Synchrotron X-ray and Neutron Fiber Diffraction // *J. Am. Chem. Soc.* 2002. V. 124 (31). P. 9074-9082.

17. Nishiyama Y., Sugiyama J., Chanzy H., Langan P. Crystal Structure and Hydrogen Bonding System in Cellulose Iα from Synchrotron X-ray and

Neutron Fiber Diffraction // J.Am. Chem. Soc. 2003. V. 125 (47). P. 14300-14306.

18. Nishiyama Y., Johnson G.P., French A.D., Forsyth V.T., Langan P. Neutron Crystallography, Molecular Dynamics, and Quantum Mechanics Studies of the Nature of Hydrogen Bonding in Cellulose I β . Biomacromolecules. 2008. Vol.9 №11. P.3133-3140.

19. Nishiyama Y. Structure and properties of the cellulose microfibril // J. Wood Sci. 2009. V. 55. P. 241-249.

20. M.S. Doblin. Cellulose biosynthesis in plants: from genes to rosettes / M.S. Doblin [et al.] // Plant Cell Physiol. – 2002. – Vol. 43. – P. 1407–1420.

21. Yu. B. Grunin L. S. Gal'braikh, S. V. Levitin, D. S. Masas. Structure and Sorption Char-

acteristics of Nanocrystallites of Chitosan. Fibre Chemistry 2016, Volume 48, Issue 4, pp. 292–297.

22. Грунин Л.Ю. Грунин Ю.Б. Никольская Е.А. Шевелева Н.Н. Николаев И.А. Изучение структуры целлюлозы в процессе адсорбции воды при помощи ЯМР-релаксации и спиновой диффузии. Биопизика: ФГУП «Издательство «Наука». Выпуск № 2, 2017, Том 62

23. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонovich А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы Учеб. пособие для вузов. – М.: Экология, 1991. – 320 с.

24. www.nmr-design.com

25. 6. Чижик В.И. Ядерная магнитная релаксация. СПб., 2004. - 385 с.

©Н.Ф. Тимербаев – д-р тех. наук, профессор, заведующий кафедры «Возобновляемые источники энергии», «Казанский государственный энергетический университет» («КГЭУ»), srekeu@gmail.com; К.Х. Гильфанов – д-р тех. наук, профессор, заведующий кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», «КГЭУ», gilfanov@kgeu.ru; Г. Ш. Гогелашвили – канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры «Физика», ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «ПГТУ»), GogelashviliGS@volgatech.net; В. И. Таланцев – старш. препод., кафедра «Лесопромышленные и химические технологии» ФГБОУ ВО «ПГТУ», TalancevVI@volgatech.com.

УДК 631.363

ПОЛНОРАЦИОННЫЙ КОМБИКОРМ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНЫХ И РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ И ТЕХНОЛОГИЯ ЕГО ПРИГОТОВЛЕНИЯ

Д.Б. Просвириков, С.Р. Закиров, К.Х. Гильфанов, М.А. Таймаров

В статье представлена ресурсо- и энергосберегающая технология эффективной переработки лесосечных отходов древесной зелени (хвоя, листья, сучья, побеги) в полнорационный комбикорм для сельскохозяйственных животных, преимущественно для крупного рогатого скота. Определен состав кормовой смеси по отдельным питательным веществам.

Ключевые слова: древесные отходы, переработка, паровзрывная обработка, полнорационный комбикорм

The article presents a resource and energy-saving technology for efficient processing of woody wastes of woody greens (needles, leaves, branches, shoots) in full-feed mixed fodder for farm animals, mainly for cattle. The composition of the feed mixture for individual nutrients was determined.

Keywords: wood waste, processing, steam explosion treatment, full-feed mixed feed

Введение

Развитие животноводства в России, как одной из приоритетных отраслей агропромышленного комплекса, ввиду реализации программ импортозамещения и

постоянного роста цен на зерно на ближайшую перспективу потребует существенного увеличения производства кормов, повышения их качества и совершенствования технологий кормопроизводства, применяя комплексные

подходы к переработке альтернативного растительного сырья [1].

На сегодняшний день обстановка в отечественной области кормопроизводства следующая: 1) более трети российских животноводческих хозяйств пользуются комбикормами собственного производства; 2) основу комбикормов составляют зерновые компоненты (до 80 % масс.) [2], цены на которые ежегодно растут с темпом 2-5%; 3) слабая усваиваемость комбикормов из-за их перенасыщенности зерновыми и недостатком белковых компонентов и аминокислот [3]; 4) отрасль зависит от урожайности зерновых, в связи с чем введение незерновых компонентов поможет снизить эту зависимость [4, 5]; 5) импортные синтетические премиксы и витаминные добавки определяют до 30 % стоимости комбикормов.

В лесозаготовительной, деревообрабатывающей и лесохимической отраслях России, которые потенциально в масштабе государства могут стать смежными с областью кормопроизводства, наблюдаются следующие тенденции: 1) объем образующихся древесных отходов (включая лесосечные) ежегодно растет и перерабатывается крайне неэффективно [7]; 2) высокоэффективные технологии глубокой переработки растительной биомассы в кормовые продукты и их компоненты с 90-х годов практически не реализуются, однако, сейчас наблюдается повышенный интерес к таким продуктам со стороны сельхозпроизводителей [6].

В свете представленных проблем предлагается раздельная сезонная обработка хвойной и лиственной древесной зелени (65-80 % масс. хвои и листьев, 10-16 % масс. коры, 8-19 % древесины сучьев), содержащей протеины, в том числе незаменимые аминокислоты (5-8% масс.), клетчатку (20-25 % масс.), экстрактивные эфирные вещества (до 20% масс.), легкоусваиваемые углеводы (35-50 % масс.), минеральные компоненты (1,5-3 % масс.), путем паровзрывной обработки растительного сырья, способствующей высвобождению лишней части эфирных веществ и понижению содержания трудноусваиваемых углеводов, что позволит получить продукт с необходимой высокой кормовой ценностью и высоким содержанием витаминов Е, К, каротина, рибофлавина, фолиевой кислоты. Такой продукт может быть использован как самостоятельная

концентрированная добавка к кормам для сельскохозяйственных животных (птица, свиньи, КРС, рыбы) или при добавлении зерновой составляющей как полнорационный комбикорм.

Технология переработки древесных и растительных отходов в полнорационный комбикорм

Технологическая схема переработки отходов лесного комплекса в полнорационный комбикорм для сельскохозяйственных животных представлена на рисунке 1.

На склад сырья поступают отходы лесозаготовок (ветви, сучья, древесная зелень, кора, пни хвойных и лиственных пород), древесные отходы (отходы деревообрабатывающих производств – горбыли, рейки, опилки, некондиционная щепа), растительные отходы сельскохозяйственного производства (отруби, хлопковая и зерновая шелуха, кочерыжки, подсолнечная лузга), фуражное зерно, шрот подсолнечный, минеральные добавки. Первичную сортировку производят по породам сырья. Отходы хвойных пород поступают в бункер 31, отходы лиственных пород – в бункер 32.

Из бункеров отходы по наклонным ленточно-скребковым транспортерам 33 поступают на горизонтальные ленточные транспортеры 34, и, проходя магнитные сепараторы 35 для улавливания металлических примесей, поступают в дробилку - измельчитель.

Отходы лиственных пород измельчают до фракции опилок в дробилке 36, работающей от привода 40. Отходы хвойных пород измельчают до фракции опилок в дробилке 37, работающей от привода 39. После этого измельченные отходы попадают в пневмотранспортеры 38, оснащенные фильтрами 41, и работающими при нагнетании воздуха общим вентилятором 42. Попадая в пневмотранспортирующую трубу, лиственные измельченные отходы направляются в циклон 43, где тяжелые древесные фракции отправляются в бункер для опилок лиственных пород 3, а легкие фракции в коллектор измельченной древесной зелени 45. Хвойные измельченные отходы направляются в циклон 44, где тяжелые древесные фракции отправляются в бункер для опилок хвойных пород 2, а легкие фракции в коллектор измельченной древесной зелени 45. Из коллектора древесная зелень в смеси хвойных и лиственных пород попадает в бункер 1. Таким образом,

древесные отходы измельчают и одновременно пневматически сортируют на опилки и древесную зелень, что позволяет вовлечь в создание полнорационного комбикорма для крупного

рогатого скота большого ассортимента древесных отходов и снизить себестоимость комбикорма.

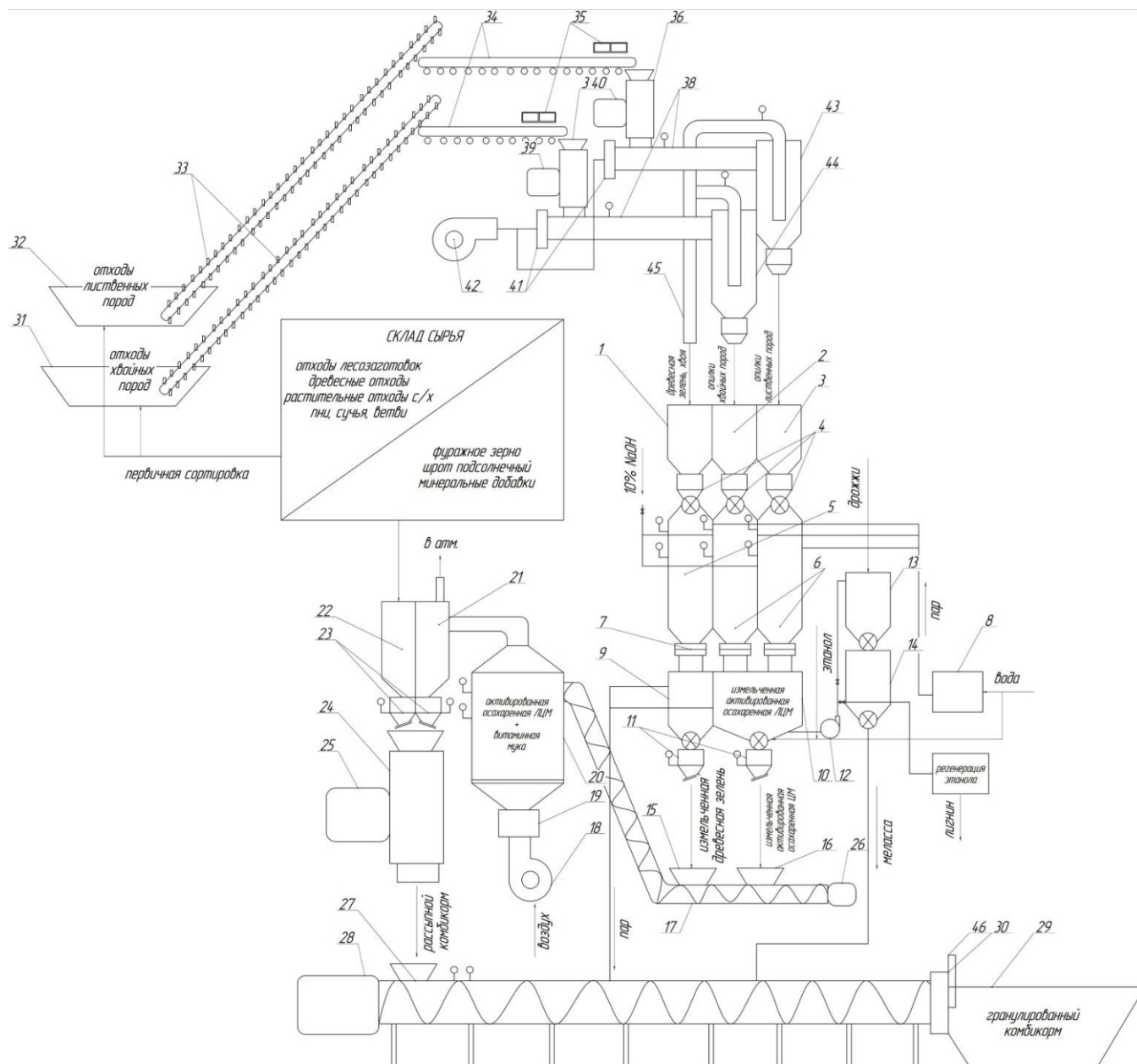


Рис. 1. Технологическая схема переработки древесных и растительных отходов в полнорационный комбикорм

Опилки лиственных пород из бункера 3 через затвор – сепаратор 4 загружают в реактор для паровзрывной обработки 6. Аналогично заполняют опилками реактор для паровзрывной обработки хвойных отходов и реактор 5 для тепловой обработки древесной зелени. После полной загрузки реакторов из соответствующих бункеров затворы 4 вместе с узлами сброса давления 7 герметично закрывают, и в реактор 6 подают 10-% раствор гидроксида натрия с

температурой 50-60 °С для пропитки опилок, а после чего насыщенный водяной пар из парогенератора 8. В реакторе для паровзрывной обработки 6 опилки лиственных пород нагревают при температуре пара 180-190 °С, давлении 1,5-1,8 МПа. В реакторе паровзрывной обработки 6 опилки хвойных пород нагревают при температуре пара 190-220 °С, давлении 2,1-2,3 МПа. В реакторе для тепловой обработки 5 древесную зелень

нагревают при температуре пара 160-180 °С, давлении 0,6-1,5 МПа, 10-% раствор гидроксида натрия не подают. Разные режимные параметры в реакторах обусловлены химическим составом обрабатываемого сырья. Обработка в реакторах составляет от 5 до 15 минут, в зависимости от сырья, его начальной влажности перед паровзрывной обработкой, а также от условий предварительной пропитки сырья растворами для интенсификации процесса.

После выдержки сырья в реакторах производят резкий сброс давления путем открытия сбросных клапанов 7. Сырье под давлением «выстреливают» в приемные резервуары. Из-за разности давлений растительное сырье разволокняется и измельчается. Таким образом, обработанную древесную зелень дефибрируют и выгружают в бункер 9, откуда через шлюзовой затвор и массовый дозатор 11 в виде влажной измельченной древесной зелени подают в гибкий шнековый транспортер 11, работающий от привода 26. Лиственные и хвойные опилки дефибрируют аналогичным образом до активированной осажаренной лигноцеллюлозной массы, которую выгружают в резервуар 10, где промывают водой.

Промывные воды с перешедшими в них растворами сахаров и олигосахаридов (гидролизат) преимущественно С5 и С6 групп насосом 12 перекачивают в инвертор гидролизата 13. В аппарате 13 производится сгущение гидролизатов, смешивание их с дрожжами для сбраживания и размножения дрожжей (белковой составляющей комбикормов). Смесь поступает в бродильный чан 14, где поддерживают определенную температуру на уровне 45-60 °С. После сбраживания сахаров в аппарате производят сепарацию дрожжей, сгущение их до состояния мелассы и подачу мелассы на выход экструдера-гранулятора 27, где ее смешивают со смесью комбикорма, увлажняя его.

После отделения сахаров в резервуар 10 подают раствор этанол-вода в массовом соотношении 80:20 % для экстракции массы от низкомолекулярного лигнина. Промывной раствор лигнина направляют на регенерацию. Влажную активированную осажаренную целлюлозную массу, освобожденную от лигнина, из резервуара 10 через шлюзовой затвор и весовой дозатор 11 подают в

шнековый транспортер 17, работающий от привода 26.

Таким образом, опилки пропитывают в присутствии 10-% раствора гидроксида натрия с температурой 50-60 °С, опилки и древесную зелень нагревают в присутствии насыщенного водяного пара с температурой 160-220 °С и давлением 0,6-2,3 МПа, что позволяет повысить часть легкоусваиваемых углеводов. Опилки до активированной осажаренной лигноцеллюлозной массы, также как и древесную зелень, дефибрируют посредством паровзрывной обработки, после чего из лигноцеллюлозной массы сахара экстрагируют водной промывкой, а низкомолекулярный лигнин экстрагируют раствором этанол-вода в массовом соотношении 80:20 %, что позволяет понизить в конечном составе корма трудно усваиваемую фракцию, обогащенную лигнином.

Пар, образующийся при сбросе давления с реакторов 5 и 6 отводится в среднюю часть экструдера для увлажнения массы и поддержания температурного режима экструдера-гранулятора.

Измельченную активированную осажаренную целлюлозную массу и древесную зелень по транспортеру 17 направляют в сушилку кипящего слоя 20, в которую вентилятором 18 подают воздух с температурой 90-105 °С, нагреваемый калорифером 19. Высушенное до требуемой влажности растительное сырье в виде сухой смеси активированной осажаренной целлюлозной массы и витаминной муки попадает в бункер растительного сырья 21, в верхней части которого отводится сушильный агент.

Со склада в бункер 22 поступает фуражное зерно, шрот подсолнечный и минеральные добавки в определенном соотношении в зависимости от рецептуры комбикорма. Оба вида сырья из бункеров 21 и 22 через массовые дозаторы подают в дробилку тонкого помола 24, работающую от привода 25, где измельчают до размера частиц 3-7 мм и одновременно смешивают. Таким образом, перед смешиванием с фуражным зерном, шротом подсолнечным и минеральными добавками активированную осажаренную целлюлозную массу и древесную зелень до состояния витаминной муки дополнительно сушат в кипящем слое при температуре 90-105 °С, все твердые компоненты с высоким и низким содержанием сырой клетчатки одновременно измельчают до размера частиц 3-7 мм и

смешивают, что позволяет создать полнорационный комбикорм для крупного рогатого скота с сохранением исходного состава протеиновой составляющей в зерне.

Полученный сухой рассыпной комбикорм поступает в шнековый экструдер-гранулятор 27, работающий от привода 28. По мере продвижения смеси по длине экструдера масса вторично нагревается как снаружи электрическим обогревом через стенку, так и внутри путем подачи в экструдер пара с резервуаров 9 и 10. Таким образом, растительное сырье, пришедшее со склада (фуражное зерно, шрот подсолнечный) проходит дополнительную термообработку. На конечной стадии экструдирования в смесь добавляют мелассу, полученную из сахаров и дрожжей на стадии экстракции активированной лигноцеллюлозной массы.

Все компоненты тщательно перемешивают, и готовый полнорационный комбикорм, путем выдавливания через фильеру 30 и режущее устройство 46, формируют в гранулы определенной длины и диаметра и собирают в бункере 29, откуда направляют на упаковку и склад готовой продукции.

Определение компонентного состава активированной осахаренной целлюлозной массы

Температура паровзрывной обработки существенно влияет на компонентный состав активированной лигноцеллюлозной массы. С целью получения кормового сырья, наиболее обогащенного сахаристыми продуктами и с меньшим содержанием трудноусваиваемой клетчатки и природного лигнина, был проведен анализ состава лигноцеллюлозной массы, получаемой после паровзрывной обработки древесины. В эксперименте была использована свежесрубленная древесина лиственных пород (преимущественно осины), измельченная до состояния опилок, с исходным содержанием целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз 50, 25, 24% соответственно, и зольностью порядка 1 %. Температура паровзрывной активации варьировалась от 160 до 210 °С. Образцы получаемой активированной массы подвергались анализу на содержание целлюлозы, лигнина и его низкомолекулярных фрагментов, гемицеллюлоз, моносахаридов, а также продуктов их распада по стандартным методикам, принятым в химическом анализе целлюлозосодержащего сырья. Содержание

протеина в древесном сырье не определялось, поскольку его количество в нем крайне мало, и он не может быть использован как компонент, восполняющий дефицит сырого протеина в разрабатываемом комбикорме. Результаты представлены на рис. 2-4.

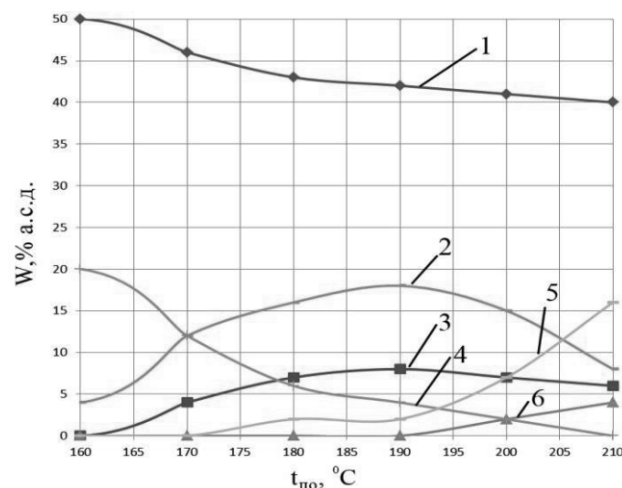


Рис. 2. Изменение компонентного состава углеводной части активированной лиственной древесной массы, % от а.с.д.: 1 – целлюлоза, 2 – простые сахара C5 группы, 3 – простые сахара C6 группы, 4 – гемицеллюлозы, 5 – продукты распада простых сахаров C5 группы, 6 – продукты распада простых сахаров C6 группы

Как видно из рисунка 2 наибольший выход простых сахаров в результате гидролитических реакций деструкции гемицеллюлоз и аморфной части целлюлозы (кривые 2, 3) приходится на температуру паровзрывной обработки 185-190 °С. С увеличением температуры содержание простых сахаров уменьшается, что связано с их деструкцией до простых веществ, содержание которых закономерно увеличивается (кривая 5, 6). Наибольшую кормовую ценность сырье имеет при максимальном содержании легкоусваиваемых сахаров. Их количество можно также увеличить за счет более глубокого гидролиза целлюлозы в присутствии кислот или щелочей, однако обработка химикатами растительного сырья может существенно сказаться на токсичности конечного продукта, в связи с чем для получения кормовой массы прибегают к процессу автогидролиза – гидролиза гемицеллюлоз и некоторой части аморфной составляющей целлюлозы в присутствии насыщенного водяного пара, в результате чего образуется слабый катализатор – уксусная и муравьиные органические кислоты, под действием которых и происходит деструкция углеводной части. Деструкция легкогидролизуемых полисахаридов, как и

переход некоторой части исходного лигнина в низкомолекулярные фрагменты, также приводит к увеличению удельной поверхности клеточной стенки, что способствует более быстрому проникновению ферментов при усваивании клетчатки и осажаренной целлюлозной массы.

На рисунке 3 представлены результаты оценки компонентного состава ароматической части активированной лиственной древесной массы. Там же показана зольность сырья.

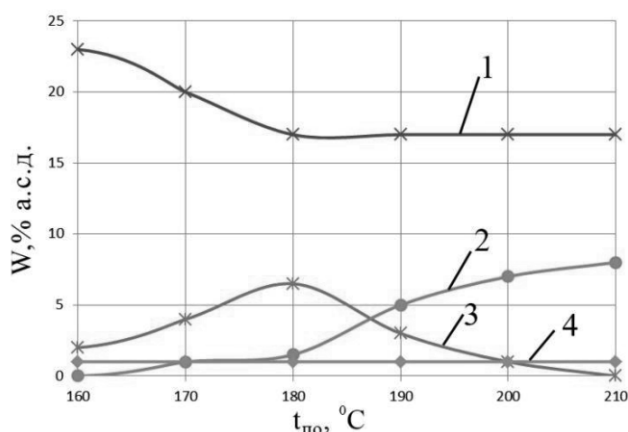


Рис. 3. Изменение компонентного состава ароматической части активированной лиственной древесной массы, % от а.с.д.: 1 – исходный лигнин, 2 – конденсированные фракции лигнина, 3 – низкомолекулярные растворимые фрагменты лигнина, 4 – зола

Как видно из рисунка 3 снижение содержания исходного лигнина приводит к образованию низкомолекулярных фрагментов (кривая 3) до температуры 180°C, после чего при повышении температуры происходит конденсация этих фрагментов в малорастворимые формы. Следовательно, активированная лигноцеллюлозная масса, полученная при более высоких температурах, будет снижать общую перевариваемость кормов на ее основе.

Базовым показателем питательности кормового сырья является содержание безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ), что представляет собой сумму масс всех полисахаридов, моносахаридов, крахмала, пектиновых веществ, лигнина, дубильных веществ. Этот показатель является расчетным. Для исследуемого сырья было подсчитано содержание БЭВ, которое представлено на рис. 4.

На рисунке 4 видно, что содержание БЭВ в активированной осажаренной лигноцеллюлоз-

ной массе увеличивается почти до 30 % от а.с.д. при температуре 190°C, после чего падает. Снижение общего содержания БЭВ связано со снижением содержания простых сахаров, гемицеллюлоз и низкомолекулярных фракций лигнина, как указывалось выше.

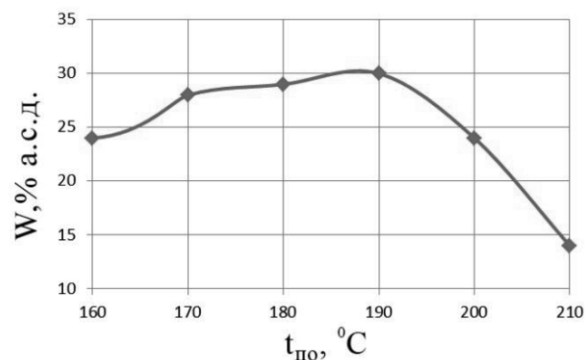


Рис. 4. Изменение суммарного содержания БЭВ (без учета влаги), % от а.с.д.

Полученные численные характеристики состава активированной осажаренной лигноцеллюлозной массы позволяют определить оптимальные температурные режимы паровзрывной обработки и рецептуру кормовой смеси на основе такой массы, зная конечные показатели комбикорма по питательности.

Определение состава полнорационного комбикорма на основе древесных и растительных отходов

Эффективность использования полнорационного комбикорма для крупного рогатого скота может быть проиллюстрирована примером, в котором показано изучение питательности корма.

Полнорационный комбикорм для крупного рогатого скота получали вышеуказанным способом. Все исследования по качественным показателям полнорационного комбикорма для крупного рогатого скота были выполнены согласно утвержденным методам исследований в соответствии со следующей нормативно-технической документацией:

1. Определение массовой доли сырого протеина – по ГОСТ 13496.4, ГОСТ 32040, ГОСТ 32044.1.

2. Определение массовой доли сырой клетчатки – по ГОСТ 13496.2, ГОСТ 31675, ГОСТ 32040.

3. Определение массовой доли жира – по ГОСТ 13496.15, ГОСТ 32040.

4. Определение массовой доли золы, не растворимой в соляной кислоте – по ГОСТ 13496.14, ГОСТ 32045.

5. Определение внешнего вида и цвета гранулированного комбикорма – по ГОСТ 22834.

6. Определение обменной энергии, кормовых единиц, безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) - расчетным методом по таблицам питательности и химического состава сырья.

7. Определение массовой доли влаги – по ГОСТ 13496.3, ГОСТ 31640, ГОСТ 32040

Исследования проведены с гранулированным комбикормом, который представляет собой светло-коричневые гранулы, плохо растворимые в воде, с хлебным запахом. В таблице

1 представлены данные по отдельным питательным веществам кормовой смеси, полученной посредством измельчения древесных отходов с одновременной пневматической сортировкой, пропитки, нагрева в присутствии насыщенного водяного пара, паровзрывного дефибрирования с последующей экстракцией, сушки в кипящем слое, смешивания всех компонентов при добавлении мелассы, гранулирования комбикорма. В состав испытуемой кормовой смеси входили компоненты при следующем их соотношении в % по массовой доле: активированная осажаренная целлюлозная масса – 40, витаминная мука из древесной зелени – 2, шрот подсолнечный – 18, фуражное зерно – 30, меласса – 8, минеральные добавки – 2.

Таблица 1 – Данные по отдельным питательным веществам кормовой смеси

Компонент кормовой смеси	КЕ, на 1 кг	Обменной энергии, МДж/кг	Вода, %	БЭВ, %	Сырая клетчатка, %	Сырой протеин, %	Сахар, %	Жир, %	Зола, %	Итого в кормовой смеси, % масс.
Активированная осажаренная целлюлозная масса, в т.ч. меласса (сахара+дрожжи)	94,7	7,17	0	57,1	21,4	21,5	0	0	0	48
Витаминная мука из древесной зелени	50	5,6	0	60	20	15	0	0	5	2
Фуражное зерно	106	12,5	13	69	3	11,5	1,5	2	0	30
Шрот подсолнечный	103	11,9	8	21,9	13,3	40,2	6,1	7,5	3	18
Минеральные добавки	0	0	0,5	0	0	0	0	0	1	2
Итоговые показатели	99	9,6	5,2	54,2	14,6	21,8	1,5	1,9	0,64	100

Таким образом, данные таблицы свидетельствуют, что измельчение древесных отходов с одновременной пневматической сортировкой, их пропитка, нагрев в присутствии насыщенного водяного пара, паровзрывное дефибрирование с последующей экстракцией, сушка в кипящем слое, смешивание с остальными компонентами при добавлении мелассы, гранулирование кормовой смеси способствуют получению полнорационного комбикорма для крупного состава протеиновой составляющей в зерне, повышена часть легкоусваиваемых углеводов на 10-13 %, понижена до 1,5-3% в конечном составе корма трудноусваиваемая фракция,

рогатого скота, содержащего 60-80% по массе компонентов с высоким содержанием сырой клетчатки и 20-40% по массе компонентов с низким содержанием сырой клетчатки, питательные свойства которого не уступают традиционным комбикормам, содержащим в своем составе до 70% по массе дорогостоящего фуражного зерна, и соответствуют требованиям ГОСТ 9268-2015. Получаемый комбикорм для крупного рогатого скота является полнорационным, в нем сохранен исходный обогащенный лигнином, за счет реализации способа вовлечено в создание корма большего ассортимента древесных отходов, снижена себестоимость в 1,3-1,6 раза.

Заключение

Предлагаемая ресурсо- и энергосберегающая технология переработки растительной биомассы в кормовые продукты для сельскохозяйственных животных обладает следующими преимуществами по сравнению с традиционными технологиями получения комбикормов: 1) сниженная доля зерновых компонентов до 40-45% против 70-80% в традиционных комбикормах; 2) цена в 2-2,3 раза ниже аналогичных по химическому составу и питательности комбикормов; 3) сбалансированный состав корма, содержащий все необходимые компоненты для полноценного рациона сельскохозяйственных животных, превосходит предлагаемые составы по содержанию витаминно-минеральных комплексов на 7-15 % (в частности витаминов Е, К, каротина, рибофлавина, фолиевой кислоты); 4) за счет паровзрывной обработки растительного сырья усваиваемость предлагаемого корма на 15-20 % выше существующих комбикормов, особенно в части усвоения белков и аминокислот с повышенной растворимостью; 5) стойкость к патогенной микрофлоре и микроскопическим грибам; 6) экологически чистый способ приготовления кормов; 7) особенности технологии позволяют регулировать режимные параметры процесса, обеспечивая производство из одного сырья широкой номенклатуры продукции (различного состава) для разных категорий сельскохозяйственных животных.

Результаты, представленные в работе, получены при поддержке Стипендии Президента Российской Федерации (СП-4422.2018.1).

Литература

1. Афанасьев, А. В. Оценка эффективности применения ресурсосберегающих, экологически чистых технологий и оборудования для производства биологически полноценных комбикормов в России и Беларуси /

А. В. Афанасьев, В. И. Передня, В. И. Володкевич // Вестник. – 2014. – Т. 1. – №. 13. – С. 43.

2. Савиных, П. А. Совершенствование комбикормового оборудования как фактор повышения качества продукции / П. А. Савиных, В. Н. Нечаев, М. Л. Нечаева // Вестник НГИЭИ. – 2016. – №. 4 (59).

3. Сыроватка, В. И. Совершенствование технологических процессов производства комбикормов в хозяйствах // Вестник. – 2014. – Т. 1. – С. 4.

4. Габачиев, Д. Т. Разработка инновационной технологии и технического средства для производства комбинированных кормов / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов, Ю. А. Шекихачев // Международный научный журнал. – Волгоград: Научное обозрение. – 2014. – №. 6. – С. 10.

5. Чериков, С. Т. Разработка технологии получения органо-минерального экструдированного комбикорма с использованием новообразующего фильтрационного осадка сахарных заводов / С. Т. Чериков и др. // Известия. – 2016. – Т. 37. – №. 1. – С. 203-208.

6. Просвирников, Д. Б. Исследование механизма паровзрывного диспергирования лигноцеллюлозного материала / Д. Б. Просвирников, Р. А. Халитов, В. А. Лашков // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – №. 1.

7. Просвирников, Д. Б. Получение фильтрующего материала на основе порошковой целлюлозы / Д. Б. Просвирников, И. Р. Ахметшин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – №. 3-2. – С. 8-2.

8. Просвирников, Д. Б. Исследование процесса получения микрокристаллической целлюлозы из активированного лигноцеллюлозного материала / Д. Б. Просвирников, И. Р. Ахметшин, С. Р. Закиров, К. Х. Гильфанов, М. В. Хузеев, М. К. Герасимов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2017. № 3. – С. 41-47.

© Д. Б. Просвирников – канд. техн. наук, доцент, с.н.с. кафедры «Переработка древесных материалов» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), prosvirnikov_dmi@mail.ru; С. Р. Закиров – аспирант, ассистент кафедры «Переработка древесных материалов» ФГБОУ ВО «КНИТУ», zsr03011987@gmail.com; К. Х. Гильфанов – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»), gilfanov@kgeu.ru; М. А. Таймаров – д-р техн. наук, профессор, кафедра «Энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

УДК 676.012

АНАЛИЗ ГИДРОФИЛЬНЫХ И БУМАГООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ МЕТОДОМ ПРОТОННОЙ МАГНИТНОЙ РЕЛАКСАЦИИ

Н.Ф. Тимербаев, М.А. Таймаров, Ю.Б. Грунин, Д.С. Масас

Методом ЯМР ^1H релаксации установлено влияние степени помола на гидрофильные свойства древесных видов целлюлозы. Показано, что для целлюлоз жирного помола характерны более высокие значения удельных поверхностей и малые величин степеней кристалличности, полученных в результате размол образцов. Показано, что метод протонной магнитной релаксации позволяет анализировать структуру и свойства диспергированной целлюлозы до наноразмерного уровня. Установлено, что при уменьшении содержания гемицеллюлоз в древесной целлюлозе путем последовательной химической обработки их гидрофильные свойства уменьшаются. Наибольший эффект удаления гемицеллюлоз достигается при последовательной химической обработке образцов ДМСО, 10% KOH, 18% NaOH.

Ключевые слова: целлюлоза, гемицеллюлозы, размол, протонный магнитный резонанс, сорбция воды, раскливающее давление

The ^1H NMR relaxation method was used to determine the influence of grinding degree on the hydrophilic properties of woody cellulose species. It is shown that higher values of specific surfaces and small values of crystallinity degrees the resulting milling samples are characteristic for fatty mills. It is shown that the method of proton magnetic relaxation allows analyzing the structure and properties of dispersed cellulose to a nanoscale level. It has been found that when the content of hemicelluloses in wood pulp is reduced by sequential chemical treatment, the hydrophilic properties of the treated samples are reduced. The greatest effect of removal of hemicelluloses is achieved by consecutive chemical treatment of DMSO samples, 10% KOH, 18% NaOH.

Keywords: cellulose, hemicellulose, grinding, proton magnetic resonance, water sorption, proppant pressure

Введение

Размол целлюлозной массы, с учетом его влияния на свойства бумажного листа, считается одним из важнейших технологических процессов целлюлозного-бумажного производства [1,2]. Из неразмолотых целлюлозных волокон на выходе получается непрочное бумажное полотно с малыми количеством межволоконных связей. Для получения бумаги с высокими физико-механическими показателями [3] размол проводят в водной среде, способствующей дефибриллированию целлюлозных волокон.

Процесс размол экономически достаточно затратен, требует больших объемов электроэнергии и воды [2]. Так, в размольных аппаратах периодического действия, в зависимости от требуемого качества выходного бумажного продукта, время размол может составлять от 0,5 до 24 часов, поэтому очень важен мониторинг данного процесса и подбор оптимальных технологических режимов для сокращения затрат на данную операцию без потери качества выходного продукта [4].

Степень помола бумажной массы традиционно определяют на приборах Шоппера-Риглера [5]. Однако для более строго экспресс-контроля бумагообразующих свойств целлюло-

зы возникает необходимость в анализе вариаций ее надмолекулярной структуры и гидрофильных свойств [2].

На стадии варочного процесса одним из важнейших компонентов, определяющим бумагообразующие свойства целлюлозной массы, является наличие в ней гемицеллюлоз, поскольку они улучшают способность целлюлозы к размолу, повышают механическую прочность бумажного листа, улучшают его проклейку [2, 3].

Для лучшего понимания корреляции традиционных методов анализа процесса дефибриллирования волокон целлюлозы и способов, базирующихся на методах ЯМР релаксации и спектроскопии, снимались зависимости времен спин-спиновой релаксации, степени кристалличности, удельной поверхности образцов как от степени помола, так и от содержания гемицеллюлоз при фиксированных значениях влаго-содержания.

Методы и материалы

Объектами исследования являлись препараты небеленой сульфатной целлюлозы (ГОСТ 9571-89). Для изучения зависимости гидрофильных и бумагообразующих свойств древес-

ной целлюлозы от содержания в ней гемицеллюлоз образцы небеленой сульфатной целлюлозы подвергались химической обработке реагентами (диметилсульфоксид, 10% КОН, 18% NaOH) для последовательного удаления из нее гемицеллюлоз. Содержание гемицеллюлоз определялось методом газожидкостной хроматографии [6].

Для получения изотерм адсорбции паров воды на целлюлозных образцах в работе проводились адсорбционные измерения методом изопиестических серий [7,8]. Предварительно высушенные при температуре 105°C в течение 12 часов образцы выдерживались в эксикаторах с заданными значениями относительных давлений паров воды до постоянной массы при 20°C.

Измерения ^1H -ЯМР релаксационных параметров образцов осуществлялись на релаксометре «Spin Track» с рабочей частотой 20 МГц. Программное обеспечение прибора позволяет задавать практически любые импульсные последовательности и осуществлять различные эксперименты [7,8] для определения протонной населенности гетерогенных фаз увлажненной целлюлозы и соответствующих им времен спин-спиновой и спин-решеточной релаксации. Времена спин-спиновой релаксации увлажненных образцов целлюлозы определялись при аппроксимации спадов поперечной релаксации экспоненциальной функцией. Для образцов целлюлозы влажностью до 5% снимались спады ССИ и Спинового Эха, а для более влажных образцов (>5%) применялась последовательность Карра-Парселла-Мейбума-Гилла (CPMG) [7]. Длительности 90° и 180° импульсов составляли 1.8 и 3.6 мкс соответственно.

В работах [8,9] было установлено, что при адсорбции паров воды на целлюлозе на одну ее поверхностную молекулу приходится в среднем одна молекула мономодсорбированной воды. Это дает основание связать степень кристалличности целлюлозы с емкостью адсорбционного монослоя воды w_m , величина которого определяется на основе предварительно снятой изотермы адсорбции с помощью решения уравнения БЭТ в линейной форме. В результате степень кристалличности определяется с помощью соотношения (1):

$$k = 1 - 9w_m. \quad (1)$$

Емкость монослоя и удельная поверхность определялись по методикам, изложенным в [8-10].

Результаты

Влияние степени помола и гидрофильные свойства целлюлозы удобно изучать по характеру молекулярной подвижности сорбированной воды. В этом случае наиболее полную информацию можно получить, анализируя зависимость времен спин-спиновой релаксации от влагосодержания исследуемых образцов.

Из рис. 1 видно, что с ростом влагосодержания кривые зависимости времени поперечной релаксации T_2 от степени помола смещаются вверх, в сторону больших времен, что, указывает на возрастание подвижности молекул связанной воды. Как и ожидалось, при малых влагосодержаниях времена спин-спиновой релаксации для целлюлозы разной степени помола очень близки. Это объясняется образованием прочных водородных связей молекул воды с гидроксильными группами поверхности целлюлозы, вследствие чего подвижность адсорбированных молекул существенно снижается.

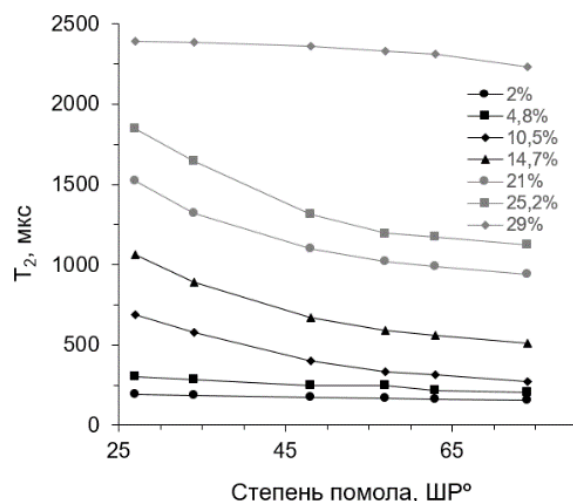


Рис. 1. Зависимость времени спин-спиновой релаксации от степени помола небеленой сульфатной целлюлозы при фиксированном влагосодержании

Снятые зависимости показывают, что для целлюлозы садкого помола вблизи 5% абсолютного влагосодержания наступает насыщение активных центров целлюлозных волокон и дальнейшая адсорбция идет по механизму образования полислоев.

В случае целлюлозы жирного помола подвижность молекул воды в районе 5% еще невелика, что связано с увеличением содержания функциональных групп на поверхности фибрилл целлюлозы при разворачивании их внутренней поверхности в процессе размолла. Это повышает гидрофильные свойства исследуемых образцов.

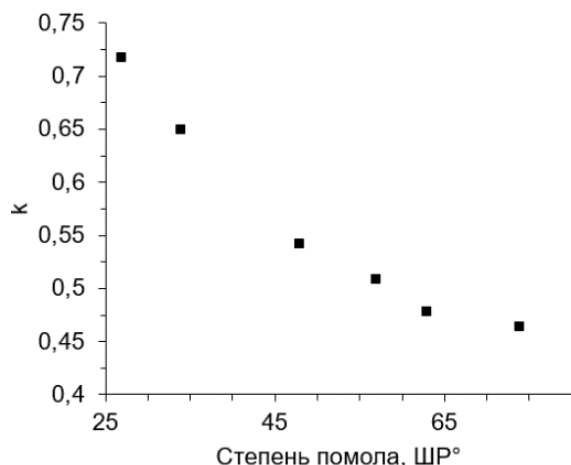


Рис. 2. Зависимость степени кристалличности, определенной адсорбционным методом, от степени помолы для образцов небеленой сульфатной целлюлозы

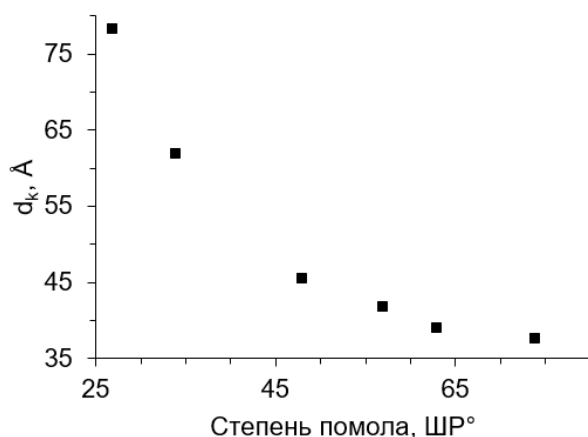


Рис. 3. Зависимость поперечных размеров кристаллитов от степени помолы для образцов небеленой сульфатной целлюлозы

Полученные нами ранее соотношения [7, 8, 11] позволяют дать количественную оценку структурных и сорбционных характеристик целлюлозы разной степени помолы (рис. 3-4). Воспользовавшись либо ЯМР, либо адсорбционным методом для определения степени кристалличности целлюлозных образцов k можно получить зависимость ее от степени помолы, которая в дальнейшем способна исключить необходимости использования установки Шопера-Риглера из производственного процесса.

Как видно из рисунка 2, с увеличением степени помолы степень кристалличности целлюлозных образцов k заметно снижается, что связано с процессами дефибрилляции кристаллитов, и выражается в снижении их поперечных размеров d_k (рис. 3). В процессе увлажнения целлюлозы, когда содержание воды превышает емкость моно слоя, в ее микропорах возникает давление за счет двух процессов. Во-

первых, адсорбирующиеся молекулы воды диффундируют в область микропор, находящихся между элементарными фибриллами в структуре микрофибрилл. При этом молекулы воды попадают в мощное ускоряющее электрическое поле со стороны активных центров гидрофильных поверхностей микропор. Внедряясь в это пространство, они переключают водородные связи типа «волоконно-волоконно», образуя связи «волоконно-моноадсорбированная вода». Во-вторых, в первых полислоях адсорбированной влаги возникает расклинивающее давление за счет уменьшения свободной энергии Геймгольца, сопровождающееся работой по образованию новой поверхности раздела «волоконно-вода» за счет расклинивающего давления со стороны поверхностных молекул адсорбционных пленок воды. Это приводит к тому, что суммарное расклинивающее давление за счет описанных эффектов составляет порядка 100 атм, что вызывает самопроизвольное дефибриллирование целлюлозы, ускоряющие процесс ее размолы.

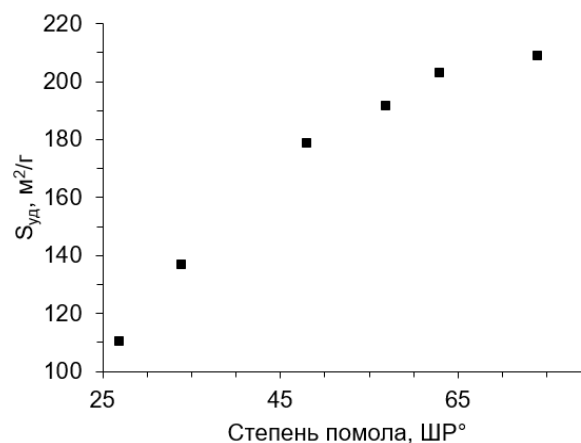


Рис. 4. Зависимость величины удельной поверхности от степени помолы для образцов небеленой сульфатной целлюлозы

Представленные результаты позволили нам, на молекулярном уровне, судить о характере дефибриллирования волокон в процессе размолы, а, следовательно, о степени их диспергирования и аморфизации, непосредственно влияющих на реакционную способность и бумагообразующие свойства целлюлозы.

Как отмечалось ранее, еще одним фактором, влияющим на характер и свойства целлюлозы, подвергающейся размолу, является наличие на ее поверхности гемицеллюлоз [12].

Полученная зависимость времени спин-спиновой релаксации T_2 химически обработанных целлюлозных образцов, для последова-

тельного удаления гемицеллюлоз, от влагосодержания позволяет сделать следующие выводы: малая подвижность воды, адсорбированной на необработанной целлюлозе, выражается в небольших значениях времен спин-спиновой релаксации T_2 (кривая 1, рис. 5). Это говорит о наличии в образце значительного количества гемицеллюлоз, обладающих повышенной адсорбционной способностью [13].

У обработанного диметилсульфоксид (ДМСО) образца (кривая 2, рис. 5) с меньшим содержанием гемицеллюлоз времена поперечной релаксации возросли, что указывает на увеличение подвижности адсорбированных молекул воды. Обработка целлюлозы ДМСО и 10%-м раствором КОН ведет к большему сокращению содержания гемицеллюлоз, особенно ксилана (табл. 1). В этом случае не удаленными должны остаться те компоненты гемицеллюлозы, которые ответственны за межмолекулярные взаимодействия поверхностных цепочек микрофибрилл. Данный эффект усиливается при обработке образцов ДМСО и 18%-м раствором NaOH (кривая 4, рис. 5). При этом уменьшение времени релаксации T_2 может быть вызвано ростом межфибриллярной микропористости и возрастанием содержания доступных гидроксильных групп, стимулирующих адсорбционный процесс.

Таблица 1 – Содержание гемицеллюлоз в образцах небеленой сульфатной целлюлозы, подвергнутых химической обработке реагентам

Вид обработки целлюлозы	Содержание гемицеллюлоз, %			
	арабана	ксилана	маннана	общее
Исходная целлюлоза	0,7	28,0	5,0	33,7
ДМСО	–	22,6	4,0	26,6
ДМСОи 10% КОН	–	5,1	3,8	8,9
ДМСОи 18% NaOH	–	3,6	3,7	7,3

Для образца целлюлозы, подвергнутого последовательной обработке ДМСО, 10%-м раствором КОН и 18%-м раствором NaOH, наблюдается дальнейшее уменьшение подвижности адсорбированных молекул воды. Зависимость от влагосодержания для этого случая представлена кривой 5. При такой обработке образца не только растворяются гемицеллюлозы, но, по-видимому, разрываются связи между молекулами целлюлозы даже в ее упорядоченных обла-

стях, что ведет к значительному увеличению числа освобожденных гидроксильных групп, способных образовывать сильные водородные связи с молекулами воды. Кривая 5 по своим параметрам близка к кривой 1, снятой для исходной целлюлозы. Аналогичная степень подвижности молекул адсорбированной на этих образцах влаги свидетельствует о близких значениях количества активных поверхностных центров, по которым идет адсорбция в обоих случаях.

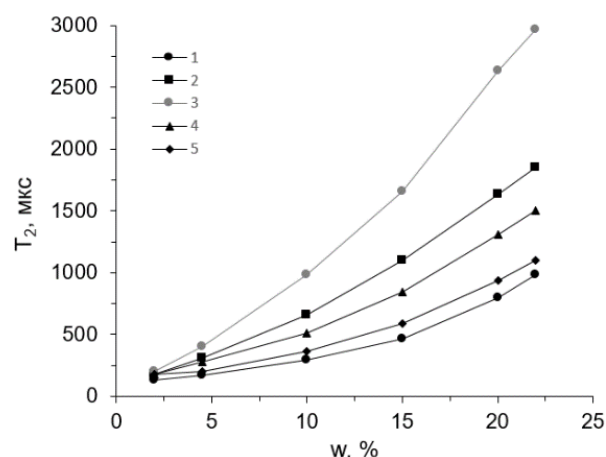


Рис. 5. Зависимость времени спин-спиновой релаксации от влагосодержания небеленой сульфатной целлюлозы, подвергнутой химической обработке реагентами для последовательного удаления из нее гемицеллюлоз: 1 – исходный образец; 2 – обработанный ДМСО; 3 – обработанный ДМСО и 10%-м раствором КОН; 4 – обработанный ДМСО и 18%-м раствором NaOH; 5 – обработанный ДМСО, 10%-м раствором КОН и 18%-м раствором NaOH

На первых этапах последовательной обработки древесной целлюлозы преобладающим процессом является снижение ее адсорбционной способности, связанное с удалением гемицеллюлоз. С проведение дальнейшей обработки целлюлозы, несмотря на существенно снижаемое содержание в ней гемицеллюлоз, адсорбция молекул воды возрастает из-за повышенной доступности к воде поверхностных гидроксильных групп целлюлозы. Вышесказанное может быть основой для решения обратной задачи, ориентированной на определение содержания гемицеллюлоз во влажных образцах, имеющих соответствующие времена спин-спиновой релаксации.

Заключение

1) Установлено, что повышение степени помола приводит к интенсивному уменьшению степени кристалличности и поперечных разме-

ров кристаллитов, входящих в состав микрофибрилл.

2) Показана роль самопроизвольного диспергирования фибрилл целлюлозы при увлажнении для ее последующего размола.

3) установлен характер изменения форм связи воды с волокнами целлюлозы в процессе ее водного размола.

4) Установлено, что содержание связанной воды существенно зависит от содержания гемицеллюлоз и характера их распределения с стенке волокна древесной целлюлозы.

5) Установлено, что наибольший эффект снижения гидрофильных свойств целлюлозы осуществляется при последовательном обработке ДМСО + 10% КОН + 18% NaOH.

Литература

1. Дж. Кларк, Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовки массы, переработки ее на бумагу, методы испытания). «Лесная промышленность», Москва, 1983, 456 с.

2. Д.М. Фляте, Технология бумаги. «Лесная промышленность», Москва, 1988, 440 с.

3. Н.Ф. Пестова, Комплексная химическая переработка древесины. СЛИ, Сыктывкар, 2013. <http://lib.sfi.komi.com>

4. Д.М. Фляте, Свойства бумаги. «Лесная промышленность», Москва, 1986, 680 с.

5. Н.Н. Непенин, Технология целлюлозы в 3-х томах. Т.3. Очистка, сушка и отбелка целлюлозы. Прочие способы получения целлюлозы. «Лесная промышленность», Москва, 1994, 592 с.

6. Ю.А. Пентин, Л.В. Вилков. Физические методы исследования в химии. АСТ, 2003, 683 с.

7. В.И. Чижик, Ядерная магнитная релаксация. Санкт-Петербург, 2004, 385 с.

8. Ю.Б. Грунин, Л.Ю. Грунин, В.И. Таланцев, Е.А. Никольская, Д.С. Масас. Высокомолекулярные соединения. Серия А. **57**, №1, 46-55 (2015).

98. Ю.Б. Грунин, Л.Ю. Грунин, В.И. Таланцев, Е.А. Никольская, Д.С. Масас. Биофизика. **60**, вып.1, 53-64 (2015).

10. Л.Ю. Грунин, Ю.Б. Грунин, Е.А. Никольская, Н.Н. Шевелева, И.А. Николаев, Биофизика. **62**, вып.2, 266-275 (2017).

11. Ю.Б. Грунин, Л.Ю. Грунин, Л.С. Гальбрайт, Н.Н. Шевелева, Д.С. Масас. Хим. волокна. №5, 31-36 (2017).

12. М.С. Дудкин, В.С. Громов, Н.А. Ведерников, Р.Г. Каткевич, Гемицеллюлозы. Рига, Зинатне, 1991, 488 с.

13. Ю.С. Иванов, Производство сульфатной целлюлозы. Часть 1. Санкт-Петербург, 2010, 78.

© **Н.Ф. Тимербаев** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры «Возобновляемые источники энергии» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»), spekgeu@gmail.com; **М.А. Таймаров** – д-р техн. наук, профессор, кафедра «Энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «КГЭУ»; **Ю.Б. Грунин** – д-р. хим. наук, профессор, кафедра физики, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «ПГТУ»), gruninyb@volgatech.net; **Д.С. Масас** – канд. техн. наук, доцент, кафедра физики ФГБОУ ВО «ПГТУ», masasds@volgatech.net.

УДК 615.322:582.287.237

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЧАГИ

Е.Ю. Разумов, Р.Р. Сафин, К. В. Саерова, В.В. Губернаторов, А.Е. Губернаторова

В работе представлен сравнительный анализ выхода ценных компонентов из гриба-чаги в зависимости от условий произрастания. Для проведения исследований были взяты образцы чаги из двух различных по климату регионов Евразии – Западной Сибири и Чехии. Установлено, что из чаги, произрастающей в Западной Сибири, выход меланина в процессе водной экстракции в среднем на 1,7% выше, чем у аналога из Чехии. Таким образом, сделан вывод, что более суровые условия произрастания, вызывающие медленный рост гриба приводят к большему накоплению им полезных веществ.

Ключевые слова: чага, экстракция, меланин.

The paper presents a comparative analysis of the yield of valuable components from the fungi-chaga, depending on the growth conditions. For the study, samples of chaga were taken from two different climate regions of Eurasia-Western Siberia and the Czech Republic. It is established that the melanin yield in the process of water extraction is 1.7% higher than that of the Czech analogue from the chaga produced in Western Siberia. Thus, it was concluded that the harsher conditions of growth, which cause a slow growth of the fungus, lead to a greater accumulation of useful substances.

Keywords: chaga, extraction, melanin

Введение

Одним из видов природного сырья, издавна применяющегося в народной медицине для лечения многих заболеваний являются наросты на березе, известные в науке под названием *Inonotus Obliquus* (трутовик скошенный), а в простонародье – чага. Данный гриб растет на березах, произрастающих в условиях достаточно холодного климата [1].

По системе Фалька, чагу относят к дереворазрушающим грибам, вызывающим белую гниль, то есть распад древесины осуществляется по коррозионному типу гниения с одновременным разрушением клетчатки и лигнина. Исходными субстратами для этого гриба являются продукты окисления сахаров и сами сахара, а также ароматические соединения, высвобождающиеся при распаде молекулы лигнина.

Исследованию чаги посвящен немалый ряд работ. Особенно актуальны исследования различных классов соединений, переходящих в водные извлечения. Ещё в средневековые знаменитый врач Абу Али ибн Сины (Авиценна) в своих трудах изучал способы применения чаги в качестве лекарственного средства [2]. В отечественной медицине известны фамилии профессоров П.А. Якимова и И.К. Булатова, благодаря своим навыкам они ввели в народную медицину экстракт берёзового гриба. Так же, немало известны фамилии таких учёных как М.Я. Шашкина, П.Н. Шашкин, А.В. Сергеев и Л.К. Горайнова, которые в своей монографии "Чага, чаговит, чаголюкс как средство профилактики и лечения больных" [3] подробно изучили и описали особенности использования препаратов на основе чаги в лечебной и профилактической практике.

В последние десятилетия наблюдается повышение интереса у зарубежных исследователей к чаге применительно к терапии предраковых состояний и рака различной этиологии. Так, польские ученые Liya Liang, Zesheng Zhangand, Hao Wang в 1998 году доказали, что чага приостанавливает рост опухоли [4]. Они выяснили, что в коре берёзы содержится бетулин – соединение, которое используется при

лечении рака. Однако, в этой форме он не может быть безопасно использован людьми. Чага же поглощает его из березы и синтезирует в таком виде, что она становится безопасной для потребления человеком. Сегодня бетулин и бетулиновая кислота изучаются не только для борьбы с раком, но также и в качестве агентов в борьбе с ВИЧ.

Satoru Arata, Jun Watanabe, Masako Maeda [5] обнаружили, что экстракты чаги ингибируют вирус гепатита С и вирус иммунодефицита человека и демонстрируют сильную антиоксидантную и иммуностимулирующую активность. В то же время они исследовали на животных, способность водных экстрактов чаги к метаболизму липидов. А также доказано, что экстракты *Inonotus Obliquus* демонстрируют мощную противоопухолевую активность и используется для лечения рака. Они стремились исследовать влияние непрерывного приема водного экстракта из чаги на подавление опухоли.

Lee S.H., Hwang H.S., Yun J.W. [6] доказали противоопухолевую активность водного экстракта чаги и выявили, что она подавляла пролиферацию (разрастание ткани организма путём размножения клеток делением) и индуцированный апоптоз (процесс программируемой клеточной гибели, в результате которого клетка распадается на отдельные апоптотические тельца) различных клеток карциномы.

Немало важную роль в исследовании чаги сыграли Ki Bae Hong, Dong Ouk Noh, Yooheon Park, Hyung Joo Suh [7]. Они доказали гепатопротекторную активность водного экстракта против индуцированного окислительным повреждением печени пептида гидропероксида в первичном культивированном гепатоците крысы.

Liuping Fan, Shaodong Ding, Lianzhong Ai, Kequan Deng [8] исследовали при помощи сефароза (препарата для метода очистки и разделения белков, основанного на их избирательном взаимодействии с лигандом), что лекарственный гриб содержит водорастворимый полисахарид (ISP2a), который *In vivo* ISP2a не только проявлял противоопухолевую активность, но

также мог значительно усилить иммунный ответ опухолевых мышей. Кроме того, ISP2a значительно улучшал пролиферацию лимфоцитов и увеличивал продукцию TNF- α . Результаты этих исследований показали, что ISP2a имеет потенциальное применение в качестве естественного противоопухолевого агента с иммуномодулирующей активностью.

Yoo Kyoung Park, Hyang BurmLee, Eun-Jae Jeon, Hack Sung Jung, Myung-Hee Kang [9] оценили влияние водных экстрактов грибов чаги на защиту от окислительного повреждения ДНК в лимфоцитах человека. Оценка окислительного повреждения проводилась с использованием электрофореза на одной ячейке для фрагментации ДНК (анализ кометы). Клетки, предварительно обработанные экстрактом чаги, показали более 40%-ное уменьшение фрагментации ДНК по сравнению с положительным контролем (обработка 100 мк/моль H_2O_2). Основываясь на этом, они сделали вывод, что обработка чагой обеспечивает клеточную защиту от повреждения эндогенной ДНК, вызванного H_2O_2 .

Чага может выступать в качестве антивирусного препарата. Так Jin Tian, Xiaoliang Hu, Dafei Liu, Hongxia Wu, Liandong Qu [10] изучили действие экстрактов *Inonotus Obliquus* против кошачьих вирусов. Используя клеточные модели кошачьего калицивироза, они продемонстрировали, что обработка чаги способна проявлять активность в клеточных анализах, а также проявлять низкую цитотоксичность. Исследование механизма действия соединения показало, что обработка калицивироза индуцирует свои ингибирующие действия непосредственно на вирусные частицы путем блокирования вирусного связывания / абсорбции. Было обнаружено проявление антивирусной активности широкого спектра действия против вируса герпеса кошки, вируса панлей копении и вируса инфекционного перитонита, который может способствовать развитию респираторных и желудочно-кишечных заболеваний у кошек. Эти данные свидетельствуют о том, что полисахариды чаги являются потенциальными антивирусными препаратами широкого спектра действия не только против кошачьих вирусов, но и возможно против вирусов опасных для человека.

Yen-Jung Chou, Wei-Chih Kan [11] и их соотечественники оценили терапевтическое воздействие полисахаридов *Inonotus Obliquus* на стрептозотоцин (вещество, токсичное для бета-клеток поджелудочной железы), индуцированные диабетические симптомы и их потенциаль-

ные механизмы: исследовали влияние чаги на массу тела, уровень глюкозы в крови, поврежденные панкреатические клетки, окислительные стрессы, противовоспалительные цитокины и ферменты, метаболизирующие глюкозу в печени. Результаты показывают, что введение экстракта чаги может восстанавливать аномальные окислительные показатели вблизи нормальных уровней.

Институт фармацевтических наук им. Гашона и кафедра зоологии Школы биологических наук, что находится в Корее [12], исследовали влияние различных фракций и компонентов гриба на жизнеспособность и апоптоз раковых клеток толстой кишки. Среди них один компонент показал наиболее эффективное ингибирование роста и был идентифицирован как пероксид эргостерина, который оказывает противоопухолевое действие в клеточных линиях колоректального рака человека.

Сербские исследователи Glamočlija, Jasmina, Ćirić, Ana, Nikolić, Miloš, Fernandes, Ângela [13] изучили химический состав и биологические свойства водных и этанольных экстрактов *Inonotus Obliquus* из Финляндии, России и Таиланда. Были протестированы их антиоксидантные, антимикробные свойства, а также цитотоксичность на различных линиях опухолевых клеток. Выявили, что экстракт чаги содержит щавелевую кислоту.

Учёные из Кореи Nguyet, Thi Minh Nguyen Lomunova [14] и их коллеги исследовали влияние 70% этанольного экстракта гриба на пищевую аллергию и обнаружили, что он в значительной степени снижает симптомы аллергии.

Научная лаборатория Китая, в составе Lishuai Ma, Haixia Chen, Wenchai Zhu [15] изучили влияние различных методов сушки (сублимационной, конвективной и вакуумной сушки) на физико-химические и антиоксидантные свойства полисахаридов *Inonotus Obliquus*. Результаты показали, что данные характеристики значительно отличаются в зависимости от способа сушки. По сравнению с конвективной и вакуумной сушкой метод лиофилизации приводил к более низкому молекулярно-массовому распределению полисахаридов, что позволяет повысить эффективность их использования в медицинских целях.

Учёные из китайской лаборатории биотехнологии лекарственных растений Zheng, W., Zhang, M., Zhao, Y., Wang, Y., Miao, K., Wei, Z. [16] пытались получить фенольные соединения из *I. Obliquus* путем ферментации. Процесс

проводили в реакторе с непрерывным перемешиванием, чтобы выяснить, как он накапливает фенольные соединения в разных средах для культивирования и обладают ли эти соединения антиоксидантной активностью. Фенольные соединения, вырабатываемые *I. Obliquus* в контрольной среде, состояли из меланинов, флавоноидов, полифенолов и мелких фенолов. Было установлено, что на их накопление влияло добавление в среду H_2O_2 , в результате чего наблюдалось повышение содержания общих внутриклеточных фенолов и меланинов, изменения в содержании внеклеточных фенолов были менее выраженными. Одновременное воздействие H_2O_2 и арбутина привели к дальнейшему увеличению производства внутриклеточных фенолов и уменьшению накопления внеклеточных фенолов. Отсюда был сделан вывод, что производство фенольных соединений на основе *I. Obliquus* усиливается за счет введения окислителя, что позволяет использовать его впоследствии в качестве надежного источника фармацевтически важных фенольных соединений.

В настоящий момент одним из соединений чаги, чей терапевтический эффект считается признанным, является меланин, представляющий собой фенольный пигмент, обладающий сильными антиоксидантными свойствами. Кроме того, меланиновые соединения, присущие многим живым организмам, включая человека, обладают свойствами защиты от ультрафиолетового излучения. В частности, поэтому в теле гриба меланин обнаруживается в основном в его поверхностных слоях и является ответственным за отличительную окраску.

Таким образом, исследования, посвященные березовому грибу – чаге – носят достаточно широкий, разносторонний характер, ввиду его жизненно важных для человека свойств. В этой связи, исследования по определению качественных характеристик гриба в зависимости от местности и условий произрастания носят для лесопромышленников актуальный характер.

Материалы и методы

Материалом для исследования содержания ценных компонентов в чаге в зависимости от местности и условий произрастания являлись по четыре образца грибов, взятых из двух регионов евразийского континента: из лесов Чешской Республики и лесов Западной Сибири Российской Федерации.

Для получения водной экстракции чаги был использован классический метод настаивания, при которой в колбу с измельченной чагой наливают дистиллированную воду в соотношении 1:6 и ставят в камеру на 5 часов при постоянной температуре 70°C . Далее полученный экстракт отделяют от шрота, который затем заливают дистиллированной водой уже в соотношении 1:4 и экстрагируют еще 5 часов при той же постоянной температуре [9]. Таким образом, процесс проводят в две ступени для более полного выделения ценных веществ. Экстракты первой и второй ступеней смешивают и дополнительно фильтруют с последующим выделением из них меланина.



Рис. 1. Измельченная чага и её высушенный экстракт

Анализ качественных показателей исследуемых грибов был осуществлен по количественной оценке содержания меланина в их составе, поскольку меланин, как отмечалось выше, один из соединений гриба, который обладает доказанным терапевтическим эффектом и востребован фармацевтической промышленностью. Химический состав образцов чаги был исследован с помощью ИК-Фурье спектрометра "Nicolet-6700".

Результаты

Результаты исследований содержания меланина в четырех образцах чаги из лесов Западной Сибири представлены в таблице 1. В таблице 2 представлены результаты аналогичных исследований касательно чаги из лесов Чешской Республики.

Анализ результатов характеризует, что содержание меланина в грибах, произрастающих на территории Западной Сибири, в среднем в

1,35 раз больше аналогичного гриба из Чехии. Данные результаты объясняются более медленным ростом гриба в более суровых российских условиях и, тем самым, более продолжительным потреблением из березы и накоплением в себе полезных веществ.

На рисунке 2 представлен ИК-спектр образцов чаги. Сопоставительный анализ данных спектроскопии показал, что в спектре обоих образцов наблюдается широкая интенсивная полоса поглощения, лежащая в области от 3550-3250 см^{-1} , что соответствует валентным колебаниям ОН-группы. Небольшой пик в области

3000-2900 см^{-1} может вызываться Н-связью. В спектре наблюдается сильное поглощение в области $\sim 1600 \text{ см}^{-1}$, характерные валентным колебаниям углеродного скелета ароматического кольца, присущего лигнину. Многочисленные пики поглощения на волновых числах в диапазоне 1500-1200 см^{-1} характеризует наличие алканов (в частности пик 1455 см^{-1} говорит о наличии структурного элемента О-СН₃), третичных спиртов (1311 см^{-1}), сложных эфиров (в частности, эфиров ароматических кислот 1269 см^{-1}).

Таблица 1 - Выход меланина в процессе водной экстракции чаги, произрастающей в Западной Сибири

№	Масса чаги	Ступени	V водного извлечения, мл	Выход меланина	
				г	%
1	10	1	25	0,4145	4,14
		2	32	0,1998	2,00
		Всего	57	0,6143	6,14
2	10	1	34	0,3997	4,00
		2	31	0,2243	2,24
		Всего	65	0,624	6,24
3	10	1	36	0,5112	5,11
		2	32	0,1821	1,82
		Всего	68	0,6933	6,90
4	10	1	36	0,4765	4,77
		2	31	0,2179	2,18
		Всего	37	0,6944	7,00
Среднее значение*			56,75±0,275	0,6565±0,1	6,57±0,1

Таблица 2 - Выход меланина в процессе водной экстракции чаги, произрастающей в Чехии

№	Масса чаги	Ступени	V водного извлечения, мл	Выхода меланина	
				г	%
1	10	1	25	0,2741	2,74
		2	32	0,1704	1,7044
		Всего	57	0,4494	4,494
2	10	1	34	0,3105	3,1
		2	31	0,1449	1,4498
		Всего	65	0,4549	4,5498
3	10	1	36	0,2990	2,99
		2	32	0,2297	2,297
		Всего	68	0,4997	4,997
4	10	1	36	0,3070	3,07
		2	31	0,1047	1,0476
		Всего	37	0,4117	4,117
Среднее значение*			56,75±0,275	0,4861±0,2	4,86±0,01

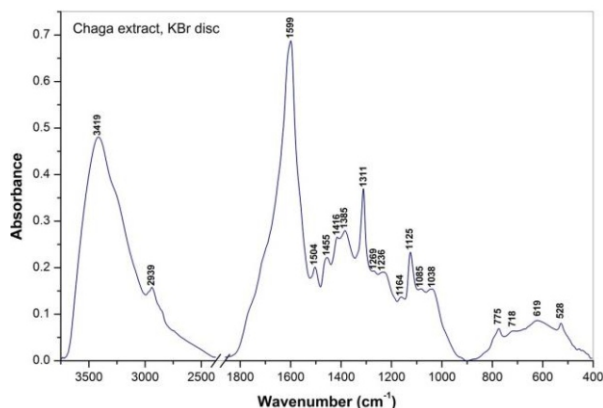


Рис. 2. ИК-спектр образцов чаги, произрастающей в Западной Сибири.

Заключение

В результате теоретических исследований было установлено, что терапевтическое действие препаратов чаги обусловлено наличием в их составе меланина, поэтому одним из важнейших качественных характеристик данного гриба является количественное содержание в ней именно этого вещества. В этой связи был выполнен сопоставительный анализ содержания меланина в грибах, произрастающих на территории Чехии и Западной Сибири, который показал увеличение выхода в среднем в 1,35 раз искомого вещества из грибов, произраставших в более суровых условиях России.

Литература

1. Chaga mushroom (*Inonotus obliquus*) induces G0/G1 arrest and a poptosis in human hepatoma HepG2 cells Myung-Ja Youn, Jin-Kyung Kim, Seong-Yeol Park, Yunha Kim, Se-Jin Kim, Jin Seok Lee, Kyu Yun Chai, Hye-Jung Kim, Ming-Xun Cui, Hong Seob So, Ki-Young Kim, Raekil Park.
2. Song, H.S.; Lee, J.L.; Kim, S.K.; Moon, W.K.; Kim, D.W.; Kim, Y.S.; Moon, K.Y. (2004) Downregulatory effect of AGI-1120 (a Glucosidase inhibitor) and Chaga mushroom (*Inonotus obliquus*) on cellular NF- κ B activation and their antioxidant activity. *Kor. J. Pharmacogn.*, 35 (1): 92.
3. Inchimura, T.; Otake, T.; Mori, H.; Maruyama, S. (1999) HIV-1 protease inhibition and anti-HIV effect of natural and synthetic water-soluble lignin-like substances. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 63 (12): 2202.
4. Рыжова Г.Л., Кравцова С.С., Матасова С.А., Грибель Н.В. и др. Химические и фармакологические свойства сухого экстракта чаги // *Химико-фармацевтический журнал*. 1997. №10. С. 44–47.
5. Сысоева М.А., Кузнецова О.Ю., Гамаюрова В.С., Халитов Ф.Г., Суханов П.П. Исследование золя водных извлечений чаги. II. Изменение изучаемой системы при проведении экстракции различными способами // *Вестник Казанского технологического университета (КГТУ)*. 2003. №2. С. 172–179.
6. Шашкина М.Я., Шашкин П.Н., Сергеев А.В., Горайнова Л.К. Чага, чаговит, чаголюкс как средство профилактики и лечения больных // *Монография* Изд. М.: Эдас, 2008.
7. Губернаторов В.В., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Р. Применение чаги в медицине и биомедицинских технологиях // В сборнике: *Молодежь и XXI век - 2017 материалы VII Международной молодежной научной конференции*: в 4 томах. 2017. С. 296–298.
8. Сысоева М.А., Хабибрахманова В.Р., Гамаюрова В.С., Кузнецова О.Ю. Способ получения водных экстрактов чаги // *патент на изобретение* RU 2343930 02.04.2007.
9. Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, П.А. Кайнов // *Вестн. Казан. технол. унив.*, 23, 76–78, (2013).
10. Сысоева М.А., Хабибрахманова В.Р., Гамаюрова В.С., Тазеева А.Х. Исследование золя водных извлечений чаги. XI. Липиды водного извлечения чаги // *Химия растительного сырья*. 2008. №3. С. 119–122.
11. Сысоева М.А., Хабибрахманова В.Р., Гамаюрова В.С., Зиятдинова Г.К., Будников Г.К. Разделение водных извлечений чаги с использованием этилацетата. I. Антиоксидантная активность // *Химия растительного сырья*. 2007. №4. С. 101–104.
12. Шариков А.М., Пашенова Н.В., Нешумаев Д.А., Новицкий Н.А. Исследование антибиотической активности гриба чаги в отношении возбудителя туляремии // *Тихоокеанский медицинский журнал*. 2010. №1. С. 64–65.
13. TaekJoon Yoon, Sue Jung Lee, Eun Young Kim, EunHee Cho, Tae Bong Kang, Kwang-Won Yu, HyungJoo Suh (2013). Chaga mushroom extract significantly reduced the total IgE levels in mice and slightly affected the production of IgG1 // *Int Immunopharmacol*. 2013 Apr; 15(4):666–70. Epub 2013 Mar 25. PMID: 23535020
14. Xianbin Ning, Qi Luo, Chuang Li, Zhaoyi Ding, Jinfeng Pang, Changfu Zhao (2014) Chaga mushroom extract can inhibit the proliferation of tumor cells // *Int J Med Mushrooms*. 2014; 16(1):29–36. PMID: 24940902
15. Liuping Fan, Shaodong Ding, Lianzhong Ai, Kequan Deng (2012) A water-soluble polysaccharide from chaga mushroom had potential as a

natural antitumor agent with immunomodulatory activity. // CarbohydrPolym. 2012 Oct 1 ;90(2):870-4. Epub 2012 Jun 17. PMID: 22840014

16. Yoo Kyoung Park, Hyang Burm Lee, Eun-Jae Jeon, Hack Sung Jung, Myung-Hee Kang(2004) Chaga mushroom treatment affords cellular protection against endogenous DNA damage produced by H₂O₂.// Biofactors. 2004 ;21(1-4):109-12. PMID: 15630179

17. Satoru Arata, Jun Watanabe, Masako Maeda, Masato Yamamoto, Hideto Matsuhashi, Mamiko Mochizuki, Nobuyuki Kagami, Kazuho Honda, Masahiro Inagaki(2016) Continuous intake of the I. obliquus extract could suppress tumor progression.Heliyon.// 2016 May ;2(5):e00111. Epub 2016 May 12. PMID: 27441282

18. Jin Tian, Xiaoliang Hu, Dafei Liu, Hongxia Wu, Liandong Qu(2017) Inonotusobliquus polysaccharides may be a potential broad-spectrum antiviral drug against feline viruses.//Int J Biol-Macromol. 2017 Feb ;95:160-167. Epub 2016 Nov 16. PMID: 27865960

19. Ju-Hee Kang, Jeong-Eun Jang, Siddhartha Kumar Mishra, Chu Won Nho, Dongyun Shin, Mi Kyung Kim Changsun Choi Seung Hyun Oh(2015) Ergosterol peroxide from Chaga mushroom (Inonotusobliquus) exhibits anti-cancer activity by down-regulation of the β -catenin pathway in colorectal cancer//Journal Title: Journal of Ethnopharmacology 15 September 2015, Pages 303-312

20. Glamočlija, Jasmina, Ćirić, Ana, Nikolić, Miloš, Fernandes, Ângela, Barros, Lillian Calhelha, Ricardo C., Ferreira, Isabel C.F.R., Soković, Mari-na, van Griensven, Leo J.L.D(2015). Chemical characterization and biological activity of Chaga (Inonotusobliquus), a medicinal “mushroom”// Serbian Ministry of Education, Science and Technological Development (173032)/13 March 2015, Pages 323-332

21. Nguyet, Thi Minh Nguyen Lomunova, Maria Le, Ba Vinh Lee, Ji Sun Park, Seol Kyu Kang, Jong Seong Kim, Young Ho Hwang, Inkyu(2018) The mast cell stabilizing activity of Chaga mushroom critical for its therapeutic effect on food allergy is derived from inotodiol// January 2018, Pages 286-295

22. Саар М. Грибы в хантыйской народной медицине. J Ethnopharmacol 1991 ; 31: 175 - 179

23. LIYA LIANG, ZESHENG ZHANG and HAO WANG Antioxidant activities of extracts and subfractions from Inonotus Obliquus//International Journal of Food Sciences and Nutrition, August 2009; 60(S2): 175-184

24. Zheng, W., Zhang, M., Zhao, Y., Wang, Y., Miao, K., & Wei, Z. (2009). Accumulation of antioxidant phenolic constituents in submerged cultures of Inonotusobliquus. Bioresource Technology, 100, 1327–1335.

25. Государственная Фармакопея СССР XI. Вып.2. Общие методы анализа. - М.: Медицина; 1990. - С. 342-343.

© **Е. Ю. Разумов** – д-р техн. наук., профессор кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»); evgeny.razumov2011@yandex.ru; **Р.Р. Сафин** – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «КНИТУ», cfaby@mail.ru; **К. В. Саерова** – студент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «КНИТУ»; **В. В. Губернаторов** – магистр кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «КНИТУ»; **А. Е. Губернаторова** - студент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «КНИТУ».

УДК 662.765.1

БАЛАНСОВО-КОНЦЕНТРАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА И ВЫХОДА ДРЕВЕСНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА. КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ЧАСТЬ

Е.М. Кашин, В.Н. Диденко

Метод позволяет определять конечные концентрации продуктов химических реакций по начальным концентрациям исходных веществ или их соединений (газов), температуре и константе равновесия химической реакции.

Ключевые слова: генераторный газ, константа равновесия химической реакции, концентрация компонента газа, гомогенная реакция, гетерогенная реакция.

The method allows to define the product concentrations of a chemical reactions, using concentrations of a starting substances, temperature and balance constant of chemical reaction.

Key words: balance constant of chemical reaction, gasifier gas, concentration of gas component, homogeneous reaction, heterogeneous reaction

Введение

В газогенераторе древесного топлива [1] одновременно протекает немалое количество различных химических реакций, в результате которых образуется генераторный газ, используемый как альтернативное топливо. Для проведения основных расчетов процессов образования генераторного газа требуется знание роли каждой реакции в системе химических превращений. Поэтому весьма актуальной является задача установления приоритета и температурных зон протекания химических реакций в газогенераторе.

Методы и материалы

В данной работе обосновываются выделение трех активных зон и выбор определяющих (основных) химических реакций при газификации древесного топлива, принятые в предлагаемом методе и частично использованные в его «Балансовой» части.

Разработка «Концентрационной» части метода позволила:

-установить приоритет и температурные (активные) зоны протекания основных химических реакций в газогенераторе;

-определять концентрации продуктов основных химических реакций в каждой из активных зон по начальным концентрациям исходных веществ или их соединений (газов), температуре и константам равновесия этих реакций.

Объектами исследования являются химическое средство реагентов и концентрации компонентов генераторного газа. Используются методики определения химического средства, расче-

та газовых концентраций и констант равновесия химической реакции.

Результаты

Способность веществ химически взаимодействовать друг с другом при $T, P = const$ определяется величиной и знаком изменения свободной энтальпии (энергии Гиббса):

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (1)$$

где ΔH - изменение энтальпии (теплового эффекта) химической реакции; ΔS - изменение энтропии химической реакции.

Химическая реакция при данных условиях ($T, P = const$) возможна, если $\Delta G < 0$. При $\Delta G = 0$ реакция находится в состоянии равновесия. При $\Delta G > 0$ химическая реакция невозможна. Чем больше по модулю отрицательная величина ΔG , тем больше реакционная способность веществ, и тем больше доля реакции в системе химических превращений.

Доля реакции в системе химических превращений определяется отношением:

$$\omega_{\text{РЕАКЦИИ}} = \Delta G_{\text{РЕАКЦИИ}} / \Delta G_{\text{ВСЕХ РЕАКЦИЙ}} \quad (2)$$

В случаях, когда $\Delta G > 0$ и химическая реакция невозможна, значение ΔG принимается равным 0 и доля реакции становится также равной 0.

Результаты расчетов изменения энергии Гиббса для различных реакций, протекающих в газогенераторе, приведены в таблице 1. Расчеты изменения энергии Гиббса выполнены по значениям изменений энтальпии и энтропии реагентов и продуктов реакций [2].

Таблица 1 - Приоритет химических реакций в газогенераторе

Реакция	$\Delta H_{p-ии}$	$\Delta S_{p-ии}$	T, K	ΔG	$\sum \Delta G$	$\omega_{p-ии}$
Окислительно-восстановительная зона (доокисление избыточным кислородом при $\alpha > 1$)						
$C + O_2 \leftrightarrow CO_2$	-393,51	2,83	1500	-397755	-1446410	0,27
$2C + O_2 \leftrightarrow 2CO$	-221	178,29	1500	-488435		0,34
$2CO + O_2 \leftrightarrow 2CO_2$	-172,51	24,77	1500	-209665		0,14
$2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O$	-483,68	-88,75	1500	-350555		0,24

Продолжение таблицы 1

Восстановительная зона						
$CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$	41,17	41,94	1200	-9158	-95810	0,10
$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	172,51	175,46	1200	-38042		0,40
$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	131,34	133,52	1200	-28884		0,30
$C + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 2H_2$	90,17	91,58	1200	-19726		0,21
Зона взаимодействия продуктов между собой и углеродом топлива						
$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41,17	-41,94	950	-1327	-5267	0,25
$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-74,85	-80,75	950	0		0,00
$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-206,19	-214,27	950	-2633,5		0,50
$CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$	-165,02	-172,33	950	-1306,5		0,25

I. Окислительно-восстановительная зона (доокисление избыточным кислородом при $\alpha > 1$)

1) $C + O_2 \leftrightarrow CO_2$.

Принято, что a - это прореагировавшее количество O_2 , выраженное в процентах от общего количества газа (100 кмоль). В виду того, что объемные концентрации компонентов генераторного газа соответствует их мольным концентрациям (генераторный газ принят в качестве идеального газа и расчет производился на 100 кмоль газа), то к моменту равновесия мольные (объемные) концентрации компонентов газа становились следующими [3]:

$$[CO_2] = R_{CO_2} + a \quad (3)$$

$$[O_2] = R_{O_2} - a \quad (4)$$

где R_{CO_2}, R_{O_2} - начальные мольные концентрации CO_2 и O_2 соответственно для данной реакции (количество компонентов газа, отнесенное к общему количеству генераторного газа - 100 кмоль);

$$R_{CO_2} = CO_2 \cdot \omega_{P-III} \quad (5)$$

$$R_{O_2} = O_2 \cdot \omega_{P-III} \quad (6)$$

где CO_2, O_2 - мольные концентрации CO_2 и O_2 соответственно, полученные в «Балансовой» части «Балансово-концентрационного» метода.

Рассматриваемая реакция является гетерогенной, поэтому концентрация углерода C , остающаяся постоянной на протяжении всей химической реакции, в выражение константы не включена.

$$K_V = \frac{[CO_2]}{[O_2]} = \frac{R_{CO_2} + a}{R_{O_2} - a} \quad (7)$$

После ряда математических преобразований получено уравнение (8), представленное в таблице 2.

Константа равновесия данной химической реакции определена по зависимости (9) [4, 5, 6, 7, 8], представленной в таблице 2.

2) $2C + O_2 \leftrightarrow 2CO$.

Принято, что b - это прореагировавшее количество O_2 , выраженное в процентах от общего количества газа (100 кмоль), тогда к моменту равновесия мольные (объемные) концентрации становились следующими [3]:

$$[CO] = R_{CO} + 2b \quad (10)$$

$$[O_2] = R_{O_2} - b \quad (11)$$

где R_{CO}, R_{O_2} - начальные мольные концентрации CO и O_2 соответственно для данной реакции;

$$R_{CO} = CO \cdot \omega_{P-III} \quad (12)$$

$$R_{O_2} = O_2 \cdot \omega_{P-III} \quad (13)$$

где CO, O_2 - мольные концентрации CO и O_2 соответственно, полученные в «Балансовой» части метода.

Рассматриваемая реакция является гетерогенной, поэтому концентрация углерода C , остающаяся постоянной на протяжении всей химической реакции, в выражение константы не включена.

$$K_V = \frac{[CO]^2}{[O_2]} = \frac{(R_{CO} + 2b)^2}{R_{O_2} - b} \quad (14)$$

После ряда математических преобразований получено уравнение (15), представленное в таблице 2, и найдены два корня b_1 и b_2 . Один из

корней отброшен в виду недостоверности значений для прореагировавшего количества O_2 .

Константа равновесия данной химической реакции определена по зависимости (16) [4, 5, 6, 7, 8], представленной в таблице 2



Через d обозначено прореагировавшее количество O_2 , выраженное в процентах от общего количества газа (100 кмоль). К моменту равновесия мольные (объемные) концентрации становились следующими [3]:

$$[CO] = R_{CO} - 2d \quad (17)$$

$$[O_2] = R_{O_2} - d \quad (18)$$

$$[CO_2] = R_{CO_2} + 2d \quad (19)$$

где $R_{CO}, R_{O_2}, R_{CO_2}$ - начальные мольные концентрации CO , O_2 и CO_2 соответственно.

$$R_{CO} = CO \cdot \omega_{P-III} \quad (20)$$

$$R_{O_2} = O_2 \cdot \omega_{P-III} \quad (21)$$

$$R_{CO_2} = CO_2 \cdot \omega_{P-III} \quad (22)$$

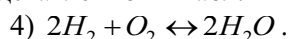
где CO, O_2, CO_2 - мольные концентрации CO , O_2 и CO_2 соответственно, полученные в «Балансовой» части «Балансово-концентрационного» метода.

Рассматриваемая реакция является гомогенной, поэтому в выражение константы включены концентрации всех исходных компонентов и всех продуктов:

$$K_V = \frac{[CO_2]^2}{[CO]^2 \cdot [O_2]} = \frac{(R_{CO_2} + 2d)^2}{(R_{CO} - 2d)^2 (R_{O_2} - d)} \quad (23)$$

После ряда математических преобразований получено уравнение 3-го порядка (24), представленное в таблице 2, корни которого найдены по формуле Кардано.

Константа равновесия химической реакции определена по зависимости (25) [4, 5, 6, 7, 8], представленной в табл. 2



Через e обозначено прореагировавшее количество O_2 , выраженное в процентах от общего количества газа (100 кмоль), тогда к моменту равновесия мольные (объемные) концентрации становились следующими [3]:

$$[H_2] = R_{H_2} - 2e \quad (26)$$

$$[O_2] = R_{O_2} - e \quad (27)$$

$$[H_2O] = R_{H_2O} + 2e \quad (28)$$

где $R_{H_2}, R_{O_2}, R_{H_2O}$ - начальные мольные концентрации H_2 , O_2 и H_2O соответственно.

$$R_{H_2} = H_2 \cdot \omega_{P-III} \quad (29)$$

$$R_{O_2} = O_2 \cdot \omega_{P-III} \quad (30)$$

$$R_{H_2O} = H_2O \cdot \omega_{P-III} \quad (31)$$

где H_2, O_2, H_2O - мольные концентрации H_2 , O_2 и H_2O соответственно, полученные в «Балансовой» части метода.

Рассматриваемая реакция является гомогенной, поэтому в выражение константы включены концентрации всех исходных компонентов и всех продуктов:

$$K_V = \frac{[H_2O]^2}{[H_2]^2 \cdot [O_2]} = \frac{(R_{H_2O} + 2e)^2}{(R_{H_2} - 2e)^2 (R_{O_2} - e)} \quad (32)$$

После ряда математических преобразований получено уравнение 3-го порядка (33), представленное в таблице 2, корни которого найдены по формуле Кардано.

Константа равновесия химической реакции определена по зависимости (34) [4, 5, 6, 7, 8], представленной в таблице 2.

Для вычисления конечных значений компонентов генераторного газа на выходе из окислительно-восстановительной зоны использованы следующие зависимости:

$$\underline{CO} = CO - \sum R_{CO} + \sum [CO] \quad (35)$$

$$\underline{CO_2} = CO_2 - \sum R_{CO_2} + \sum [CO_2] \quad (36)$$

$$\underline{H_2} = H_2 - \sum R_{H_2} + \sum [H_2] \quad (37)$$

$$\underline{H_2O} = H_2O - \sum R_{H_2O} + \sum [H_2O] \quad (38)$$

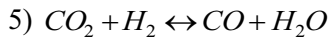
$$\underline{N_2} = 100 - (\underline{CO} + \underline{CO_2} + \underline{H_2} + \underline{H_2O}) \quad (39)$$

где CO, CO_2, H_2, H_2O, N_2 - начальные мольные концентрации соответствующих компонентов генераторного газа, полученные в «Балансовой» части метода.

Таблица 2 - Уравнения для вычисления констант равновесия и концентраций продуктов химических реакций окислительно-восстановительной зоны

№	Уравнение
(8)	$a = \frac{K_V R_{O_2} - R_{CO_2}}{K_V + 1}$
(9)	$\lg K_V = \frac{20582,8}{T} - 0,302 \lg T + 0,143 \cdot 10^{-3} T - 0,24 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,622$
(15)	$4b^2 + (4R_{CO} + K_V)b + R_{CO}^2 - K_V R_{O_2} = 0$
(16)	$\lg K_V = \frac{11635,1}{T} + 2,1656 \lg T - 0,94 \cdot 10^{-3} T + 0,876 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,394$
(24)	$-4K_V d^3 + (4K_V R_{O_2} + 4K_V R_{CO} - 4)d^2 - (4K_V R_{O_2} R_{CO} + K_V R_{CO}^2 + 4R_{CO_2}^2)d + K_V R_{O_2} R_{CO} - R_{CO_2} = 0$
(25)	$\lg K_V = \frac{29530,5}{T} - 2,769 \lg T + 1,225 \cdot 10^{-3} T - 0,1356 \cdot 10^{-6} T^2 - 2,15$
(33)	$-4K_V e^3 + (4K_V R_{H_2} + 4K_V R_{O_2} - 4)e^2 - (K_V R_{H_2}^2 + 4K_V R_{H_2} R_{O_2} + 4R_{H_2O})e + K_V R_{H_2}^2 R_{O_2} - R_{H_2}^2 = 0$
(34)	$\lg K_V = \frac{25116,1}{T} - 0,9466 \lg T - 7,216 \cdot 10^{-4} T + 1,618 \cdot 10^{-7} T^2 - 1,714$

II. Восстановительная зона



Через f обозначено прореагировавшее количество H_2 , выраженное в процентах от общего количества газа (100 кмоль), тогда к моменту равновесия молярные (объемные) концентрации становились следующими [3]:

$$[CO_2] = R_{CO_2} - f \quad (40)$$

$$[H_2] = R_{H_2} - f \quad (41)$$

$$[CO] = R_{CO} + f \quad (42)$$

$$[H_2O] = R_{H_2O} + f \quad (43)$$

где $R_{CO_2}, R_{H_2}, R_{CO}, R_{H_2O}$ - начальные молярные концентрации CO_2, H_2, CO и H_2O соответственно.

$$R_{CO_2} = \underline{CO_2} \cdot \omega_{P-III} \quad (44)$$

$$R_{H_2} = \underline{H_2} \cdot \omega_{P-III} \quad (45)$$

$$R_{CO} = \underline{CO} \cdot \omega_{P-III} \quad (46)$$

$$R_{H_2O} = \underline{H_2O} \cdot \omega_{P-III} \quad (47)$$

где $\underline{CO_2}, \underline{H_2}, \underline{CO}, \underline{H_2O}$ - молярные концентрации CO_2, H_2, CO и H_2O соответственно, получен-

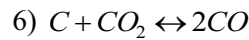
ные на выходе из окислительно-восстановительной зоны.

Рассматриваемая реакция является гомогенной, поэтому в выражение константы включены концентрации всех исходных компонентов и всех продуктов:

$$K_V = \frac{[CO] \cdot [H_2O]}{[CO_2] \cdot [H_2]} = \frac{(R_{CO} + f)(R_{H_2O} + f)}{(R_{CO_2} - f)(R_{H_2} - f)} \quad (48)$$

После математических преобразований получено квадратное уравнение (49), представленное в таблице 3.

Константа равновесия химической реакции определена по зависимости (50)[4, 5, 6, 7, 8], представленной в таблице 3.



Через g обозначено прореагировавшее количество CO_2 , выраженное в процентах от общего количества газа (100 кмоль), тогда к моменту равновесия молярные (объемные) концентрации становились следующими [3]:

$$[CO_2] = R_{CO_2} - g \quad (51)$$

$$[CO] = R_{CO} + 2g \quad (52)$$

где R_{CO_2}, R_{CO} - начальные молярные концентрации CO_2 и CO соответственно.

$$R_{CO_2} = \underline{CO_2} \cdot \omega_{P-III} \quad (53)$$

$$R_{CO} = \underline{CO} \cdot \omega_{P-III} \quad (54)$$

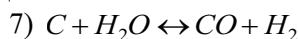
где $\underline{CO_2}$, $\underline{CO}$ - молярные концентрации CO_2 и CO соответственно, полученные на выходе из окислительно-восстановительной зоны.

Рассматриваемая реакция является гетерогенной, поэтому концентрация углерода C , остающаяся постоянной на протяжении всей реакции, в выражение константы равновесия не включена.

$$K_V = \frac{[CO]^2}{[CO_2]} = \frac{(R_{CO} + 2g)^2}{R_{CO_2} - g} \quad (55)$$

После математических преобразований получено квадратное уравнение (56), представленное в таблице 3.

Константа равновесия химической реакции определена по зависимости (57) [4, 5, 6, 7, 8], представленной в табл.3.



Через i обозначено прореагировавшее количество H_2O , выраженное в процентах от общего количества газа (100 кмоль), тогда к моменту равновесия молярные (объемные) концентрации становились следующими [3]:

$$[H_2O] = R_{H_2O} - i \quad (58)$$

$$[CO] = R_{CO} + i \quad (59)$$

$$[H_2] = R_{H_2} + i \quad (60)$$

где R_{H_2O} , R_{CO} , R_{H_2} - начальные молярные концентрации H_2O , CO и H_2 соответственно.

$$R_{H_2O} = \underline{H_2O} \cdot \omega_{P-III} \quad (61)$$

$$R_{CO} = \underline{CO} \cdot \omega_{P-III} \quad (62)$$

$$R_{H_2} = \underline{H_2} \cdot \omega_{P-III} \quad (63)$$

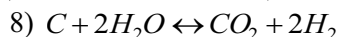
где $\underline{H_2O}$, $\underline{CO}$, $\underline{H_2}$ - молярные концентрации H_2O , CO и H_2 соответственно, полученные на выходе из окислительно-восстановительной зоны.

Рассматриваемая реакция является гетерогенной, поэтому концентрация углерода C , остающаяся постоянной на протяжении всей реакции, в выражение константы равновесия не включена.

$$K_V = \frac{[CO] \cdot [H_2]}{[H_2O]} = \frac{(R_{CO} + i)(R_{H_2} + i)}{R_{H_2O} - i} \quad (64)$$

После математических преобразований получено квадратное уравнение (65), представленное в таблице 3.

Константа равновесия химической реакции определена по зависимости (66) [4, 5, 6, 7, 8], представленной в таблице 3.



Через $2j$ обозначено прореагировавшее количество H_2O , выраженное в процентах от общего количества газа (100 кмоль), тогда к моменту равновесия молярные (объемные) концентрации становились следующими [3]:

$$[H_2O] = R_{H_2O} - 2j \quad (67)$$

$$[CO_2] = R_{CO_2} + j \quad (68)$$

$$[H_2] = R_{H_2} + 2j \quad (69)$$

где R_{H_2O} , R_{CO_2} , R_{H_2} - начальные молярные концентрации H_2O , CO_2 и H_2 соответственно.

$$R_{H_2O} = \underline{H_2O} \cdot \omega_{P-III} \quad (70)$$

$$R_{CO_2} = \underline{CO_2} \cdot \omega_{P-III} \quad (71)$$

$$R_{H_2} = \underline{H_2} \cdot \omega_{P-III} \quad (72)$$

где $\underline{H_2O}$, $\underline{CO_2}$, $\underline{H_2}$ - молярные концентрации H_2O , CO_2 и H_2 соответственно, полученные на выходе из окислительно-восстановительной зоны.

Рассматриваемая реакция является гетерогенной, поэтому концентрация углерода C , остающаяся постоянной на протяжении всей реакции, в выражение константы равновесия не включена.

$$K_V = \frac{[CO_2] \cdot [H_2]^2}{[H_2O]^2} = \frac{(R_{CO_2} + j)(R_{H_2} + 2j)^2}{(R_{H_2O} - 2j)^2} \quad (73)$$

После математических преобразований получено уравнение 3-го порядка (74), представленное в таблице 3, корни которого найдены по формуле Кардано.

Константа равновесия химической реакции определена по зависимости (75) [4, 5, 6, 7, 8], представленной в таблице 3.

Таблица 3 - Уравнения для вычисления констант равновесия и концентраций продуктов химических реакций восстановительной зоны

№	Уравнение
(49)	$(1 - K_V) f^2 - (R_{CO} + R_{H_2O} + K_V R_{CO_2} + K_V R_{H_2}) f + R_{CO} R_{H_2O} - K_V R_{CO_2} R_{H_2} = 0$
(50)	$\lg K_V = -\frac{2207,2}{T} + 0,9115 \lg T - 9,738 \cdot 10^{-4} T + 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,098$
(56)	$4 g^2 + (4 R_{CO} + K_V) g + R_{CO}^2 - K_V R_{CO_2} = 0$
(57)	$\lg K_V = -\frac{8947,7}{T} + 2,4673 \lg T - 1,0824 \cdot 10^{-3} T + 0,116 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,772$
(65)	$i^2 + (R_{CO} + R_{H_2} + K_V) i + R_{CO} R_{H_2} - K_V R_{H_2O} = 0$
(66)	$\lg K_V = -\frac{6740,5}{T} + 1,5561 \lg T - 1,092 \cdot 10^{-4} T - 0,37 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,554$
(74)	$4 j^3 + 4 (R_{H_2} + R_{CO_2} - K_V) j^2 + 4 (R_{CO_2} R_{H_2} + R_{H_2}^2 + K_V R_{H_2O}) j + R_{CO_2} R_{H_2}^2 - K_V R_{H_2O}^2 = 0$
(75)	$\lg K_V = -\frac{4533,3}{T} + 0,6446 \lg T + 8,616 \cdot 10^{-4} T - 1,858 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,336$

Для вычисления конечных значений компонентов генераторного газа на выходе из восстановительной зоны использованы следующие зависимости:

$$\underline{\underline{CO}} = \underline{\underline{CO}} - \sum R_{CO} + \sum [CO] \quad (76)$$

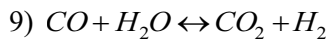
$$\underline{\underline{CO_2}} = \underline{\underline{CO_2}} - \sum R_{CO_2} + \sum [CO_2] \quad (77)$$

$$\underline{\underline{H_2}} = \underline{\underline{H_2}} - \sum R_{H_2} + \sum [H_2] \quad (78)$$

$$\underline{\underline{H_2O}} = \underline{\underline{H_2O}} - \sum R_{H_2O} + \sum [H_2O] \quad (79)$$

$$\underline{\underline{N_2}} = 100 - (\underline{\underline{CO}} + \underline{\underline{CO_2}} + \underline{\underline{H_2}} + \underline{\underline{H_2O}}) \quad (80)$$

III. Зона взаимодействия продуктов между собой и углеродом топлива



Через k обозначено прореагировавшее количество H_2O , выраженное в процентах от общего количества газа (100 кмоль), тогда к моменту равновесия мольные (объемные) концентрации становились следующими [3]:

$$[CO] = R_{CO} - k \quad (81)$$

$$[H_2O] = R_{H_2O} - k \quad (82)$$

$$[CO_2] = R_{CO_2} + k \quad (83)$$

$$[H_2] = R_{H_2} + k \quad (84)$$

где $R_{CO}, R_{H_2O}, R_{CO_2}, R_{H_2}$ - начальные мольные концентрации CO , H_2O , CO_2 и H_2 соответственно.

$$R_{CO} = \underline{\underline{CO}} \cdot \omega_{P-III} \quad (85)$$

$$R_{H_2O} = \underline{\underline{H_2O}} \cdot \omega_{P-III} \quad (86)$$

$$R_{CO_2} = \underline{\underline{CO_2}} \cdot \omega_{P-III} \quad (87)$$

$$R_{H_2} = \underline{\underline{H_2}} \cdot \omega_{P-III} \quad (88)$$

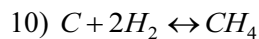
где $\underline{\underline{CO}}, \underline{\underline{H_2O}}, \underline{\underline{CO_2}}, \underline{\underline{H_2}}$ - мольные концентрации CO, H_2O, CO_2 и H_2 соответственно, полученные на выходе из восстановительной зоны.

Рассматриваемая реакция является гомогенной, поэтому в выражение константы включены концентрации всех исходных компонентов и всех продуктов

$$K_V = \frac{[CO_2] \cdot [H_2]}{[CO] \cdot [H_2O]} = \frac{(R_{CO_2} + k)(R_{H_2} + k)}{(R_{CO} - k)(R_{H_2O} - k)} \quad (89)$$

После математических преобразований получено квадратное уравнение (90), представленное в таблице 4.

Константа равновесия химической реакции определена по зависимости (91) [4, 5, 6, 7, 8], представленной в табл.4.



Через $2m$ обозначено прореагировавшее количество H_2 , выраженное в процентах от об-

щего количества газа (100 кмоль), тогда к моменту равновесия молярные (объемные) концентрации становились следующими [3]:

$$[H_2] = R_{H_2} - 2m \quad (92)$$

$$[CH_4] = R_{CH_4} + m \quad (93)$$

где R_{H_2} , R_{CH_4} - начальные молярные концентрации H_2 , и CH_4 соответственно.

$$R_{H_2} = \frac{H_2}{\omega_{P-III}} \quad (94)$$

$$R_{CH_4} = \frac{CH_4}{\omega_{P-III}} \quad (95)$$

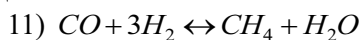
где $\frac{H_2}{\omega_{P-III}}$, $\frac{CH_4}{\omega_{P-III}}$ - молярные концентрации H_2 и CH_4 соответственно, полученные на выходе из восстановительной зоны.

Рассматриваемая реакция является гетерогенной, поэтому концентрация углерода C , остающаяся постоянной на протяжении всей реакции, в выражение константы равновесия не включена.

$$K_V = \frac{[CH_4]}{[H_2]^2} = \frac{R_{CH_4} + m}{(R_{H_2} - 2m)^2} \quad (96)$$

После математических преобразований получено квадратное уравнение (97), представленное в таблице 4. Поскольку метан CH_4 отсутствует среди компонентов генераторного газа в окислительно-восстановительной и восстановительной зонах, то $R_{CH_4} = 0$

Константа равновесия химической реакции определена по зависимости (98) [4, 5, 6, 7, 8], представленной в табл.4.



Через $3n$ обозначено прореагировавшее количество H_2 , выраженное в процентах от общего количества газа (100 кмоль). Тогда к моменту равновесия молярные (объемные) концентрации становились следующими [3]:

$$[H_2] = R_{H_2} - 3n \quad (99)$$

$$[CO] = R_{CO} - n \quad (100)$$

$$[CH_4] = R_{CH_4} + n \quad (101)$$

$$[H_2O] = R_{H_2O} + n \quad (102)$$

где R_{CO} , R_{H_2} , R_{CH_4} , R_{H_2O} - начальные молярные концентрации CO , H_2 , CH_4 и H_2O соответственно.

$$R_{CO} = \frac{CO}{\omega_{P-III}} \quad (103)$$

$$R_{H_2} = \frac{H_2}{\omega_{P-III}} \quad (104)$$

$$R_{CH_4} = \frac{CH_4}{\omega_{P-III}} \quad (105)$$

$$R_{H_2O} = \frac{H_2O}{\omega_{P-III}} \quad (106)$$

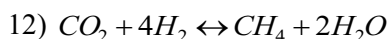
где $\frac{CO}{\omega_{P-III}}$, $\frac{H_2}{\omega_{P-III}}$, $\frac{CH_4}{\omega_{P-III}}$, $\frac{H_2O}{\omega_{P-III}}$ - молярные концентрации CO , H_2 , CH_4 и H_2O соответственно, полученные на выходе из восстановительной зоны.

Рассматриваемая реакция является гомогенной, поэтому в выражение константы включена концентрации всех исходных компонентов и всех продуктов:

$$K_V = \frac{[CH_4] \cdot [H_2O]}{[CO] \cdot [H_2]^3} = \frac{(R_{CH_4} + n)(R_{H_2O} + n)}{(R_{CO} - n)(R_{H_2} - 3n)^3} \quad (107)$$

После математических преобразований получено уравнение 4-го порядка (108), представленное в таблице 4, решенное численным методом. Поскольку метан CH_4 отсутствует среди компонентов генераторного газа в окислительно-восстановительной и восстановительной зонах, то $R_{CH_4} = 0$.

Константа равновесия химической реакции определена по зависимости (109) [5], представленной в табл.4.



Через $4p$ обозначено прореагировавшее количество H_2 , выраженное в процентах от общего количества газа (100 кмоль), тогда к моменту равновесия молярные (объемные) концентрации становились следующими [3]:

$$[H_2] = R_{H_2} - 4p \quad (110)$$

$$[CO_2] = R_{CO_2} - p \quad (111)$$

$$[CH_4] = R_{CH_4} + p \quad (112)$$

$$[H_2O] = R_{H_2O} + 2p \quad (113)$$

где R_{CO_2} , R_{H_2} , R_{CH_4} , R_{H_2O} - начальные молярные концентрации CO_2 , H_2 , CH_4 и H_2O соответственно.

$$R_{CO_2} = \underline{CO_2} \cdot \omega_{P-III} \quad (114)$$

$$R_{H_2} = \underline{H_2} \cdot \omega_{P-III} \quad (115)$$

$$R_{CH_4} = \underline{CH_4} \cdot \omega_{P-III} \quad (116)$$

$$R_{H_2O} = \underline{H_2O} \cdot \omega_{P-III} \quad (117)$$

где $\underline{CO_2}$, $\underline{H_2}$, $\underline{CH_4}$, $\underline{H_2O}$ - мольные концентрации CO_2 , H_2 , CH_4 и H_2O соответственно, полученные на выходе из восстановительной зоны.

Рассматриваемая реакция является гомогенной, поэтому в выражение константы включены концентрации всех исходных компонентов и всех продуктов:

$$K_V = \frac{[CH_4] \cdot [H_2O]^2}{[CO] \cdot [H_2]^4} = \frac{(R_{CH_4} + p)(R_{H_2O} + 2p)^2}{(R_{CO} - p)(R_{H_2} - 4p)^4} \quad (118)$$

После математических преобразований получено уравнение 5-го порядка (119), представленное в табл.4, решенное численным методом. Поскольку метан CH_4 отсутствует среди компонентов генераторного газа в окислительно-восстановительной и восстановительной зонах, то $R_{CH_4} = 0$.

Константа равновесия химической реакции определена по зависимости (120) [5], представленной в таблице4.

Таблица 4 - Уравнения для вычисления констант равновесия и концентраций продуктов химических реакций зоны взаимодействия продуктов между собой и углеродом топлива

№	Уравнение
(90)	$(K_V - 1)k^2 - (K_V R_{CO} + K_V R_{H_2O} + R_{CO_2} + R_{H_2})k + K_V R_{CO} R_{H_2O} - R_{CO_2} R_{H_2} = 0$
(91)	$\lg K_V = \frac{2207,2}{T} - 0,9115 \lg T + 9,738 \cdot 10^{-4} T - 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 - 0,098$
(97)	$4 K_V m^2 - (4 K_V R_{H_2} + 1)m + K_V R_{H_2}^2 - R_{CH_4} = 0$
(98)	$\lg K_V = \frac{3348}{T} - 5,57 \lg T + 0,186 \cdot 10^{-2} T - 1,095 \cdot 10^{-7} T^2 + 11,79$
(108)	$27 K_V n^4 - 27 K_V (R_{CO} + R_{H_2})n^3 + (27 K_V R_{CO} R_{H_2} + 9 K_V R_{H_2} - 1)n^2 - (9 K_V R_{CO} R_{H_2}^2 + K_V R_{H_2}^3 + R_{CH_4} + R_{H_2O})n + K_V R_{CO} R_{H_2}^3 - R_{CH_4} R_{H_2O} = 0$
(109)	$\lg K_V = \frac{9874}{T} - 7,14 \lg T + 0,188 \cdot 10^{-2} T - 0,094 \cdot 10^{-6} T^2 + 8,64$
(119)	$-256 K_V p^5 + 256 K_V (R_{CO_2} + R_{H_2})p^4 - (256 K_V R_{CO_2} R_{H_2} + 32 K_V R_{H_2}^2 + 4)p^3 - (64 K_V R_{H_2}^2 - 32 K_V R_{CO_2} R_{H_2}^2 + 4 R_{H_2O} + 4 R_{CH_4} - 16 K_V R_{H_2}^3)p^2 - (16 K_V R_{CO_2} R_{H_2}^3 - 64 K_V R_{CO} R_{H_2}^2 + K_V R_{H_2}^4 + 4 R_{CH_4} R_{H_2O} + R_{H_2O}^2)p + K_V R_{CO_2} R_{H_2}^4 - R_{CH_4} R_{H_2O}^2 = 0$
(120)	$\lg K_V = \frac{7674}{T} - 6,231 \lg T + 0,906 \cdot 10^{-3} T + 0,596 \cdot 10^{-7} T^2 + 8,79$

Для вычисления конечных значений компонентов генераторного газа на выходе из зоны взаимодействия продуктов между собой и углеродом топлива использованы следующие выражения:

$$\underline{CO} = \underline{CO} - \sum R_{CO} + \sum [CO] \quad (121)$$

$$\underline{CO_2} = \underline{CO_2} - \sum R_{CO_2} + \sum [CO_2] \quad (122)$$

$$\underline{H_2} = \underline{H_2} - \sum R_{H_2} + \sum [H_2] \quad (123)$$

$$\underline{H_2O} = \underline{H_2O} - \sum R_{H_2O} + \sum [H_2O] \quad (124)$$

$$\underline{CH_4} = \underline{CH_4} - \sum R_{CH_4} + \sum [CH_4] \quad (125)$$

$$\underline{N_2} = 100 - \left(\underline{CO} + \underline{CO_2} + \underline{H_2} + \underline{H_2O} + \underline{CH_4} \right) \quad (126)$$

Результаты расчетов по «Балансово-концентрационному» методу, приведенные в таблице 6 и таблице 8, сравнивались с данными газового анализа сухого состава генераторного

газа [9, 10, 11, 12], приведенными в таблице 5 и таблице 7. Сравнение расчетных и опытных данных осуществлялось при одинаковых значениях содержания азота N_2 , не участвующего ни в одной из химических реакций. Так данные опытов Д.Б. Гинзбурга [9] по газификации березы с влажностью 28% и ели с влажностью 25,5%

сопоставлялись с аналогичными расчетами авторов при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 0,25 \div 0,27$. Получено приемлемое совпадение расчетных и опытных значений состава генераторного газа по всем его компонентам.

Таблица 5 - Сухой состав генераторного газа по данным Гинзбурга Д.Б. [9], Лямина В.А. [10], Коллерова Л.К. [11] и Токарева Г.Г. [12]

α	$CO, \%$	$CO_2, \%$	$H_2, \%$	$O_2, \%$	$CH_4, \%$	$N_2, \%$	$Q_H^p, \text{кДж}/\text{м}^3$
Гинзбург Д.Б. [9]. Топливо: береза с влажностью W=28%							
-	27,5	7,6	11,4	0,4	1,9	50,8	5619
Лямин В.А. [10]. Топливо: береза с влажностью W=15-20%							
-	30,8	4,3	5,6	0,3	1,4	57,6	5035
Коллеров Л.К. [11]. Топливо: древесные чурки							
-	19,5	9,8	16,3	1,7	2,5	50,2	5125
Токарев Г.Г. [12]. Топливо: древесные чурки							
-	18-21	8-12	12-17	0,1-0,2	2,5-3,5	50,5-55,5	4467-5756

Таблица 6 - Сухой состав генераторного газа по «Балансово-концентрационному» методу. Топливо: береза с влажностью W=28%*

α	$CO, \%$	$CO_2, \%$	$H_2, \%$	$O_2, \%$	$CH_4, \%$	$N_2, \%$	$Q_H^p, \text{кДж}/\text{м}^3$
0,1	30,55	11,96	13,16	0,00	5,98	38,35	7450
0,2	26,95	10,13	11,34	0,00	5,28	46,31	6543
0,21	26,64	9,98	11,18	0,00	5,21	46,99	6465
0,22	26,33	9,83	11,03	0,00	5,15	47,65	6389
0,23	26,04	9,68	10,88	0,00	5,10	48,30	6314
0,24	25,75	9,54	10,74	0,00	5,04	48,92	6242
0,25	25,46	9,40	10,58	0,00	4,99	49,57	6170
0,26	25,18	9,27	10,45	0,00	4,94	50,16	6101
0,27	24,92	9,14	10,33	0,00	4,88	50,73	6034
0,28	24,65	9,01	10,18	0,00	4,83	51,33	5967
0,29	24,39	8,88	10,05	0,00	4,78	51,89	5902
0,3	24,14	8,76	9,93	0,00	4,74	52,44	5840
0,4	21,87	7,70	8,79	0,00	4,31	57,32	5277
0,5	19,95	6,75	7,52	0,00	4,03	61,75	4795
0,6	18,41	6,14	6,80	0,00	3,81	64,84	4440
0,7	16,78	5,53	5,51	0,00	3,73	68,46	4066
0,8	15,65	5,04	4,96	0,00	3,51	70,84	3785
0,9	14,66	4,62	4,47	0,00	3,33	72,92	3540
1,0	13,79	4,25	4,02	0,00	3,17	74,77	3325
1,1	12,92	4,14	1,82	0,52	3,25	77,36	3004
1,2	12,66	5,22	4,00	0,99	2,44	74,68	2919
1,3	12,08	5,44	3,30	1,38	2,31	75,49	2722
1,4	11,44	5,18	2,91	1,73	2,16	76,58	2546
1,5	11,12	5,21	2,65	2,03	2,08	76,92	2445
1,6	10,85	5,28	2,61	2,31	1,95	76,99	2363
1,7	10,60	5,33	2,48	2,56	1,86	77,17	2286
1,8	10,38	5,35	2,35	2,78	1,79	77,36	2215
1,9	10,17	5,37	2,19	2,97	1,72	77,57	2150
2,0	9,97	5,38	2,03	3,15	1,67	77,79	2089
3,0	8,67	5,33	0,60	4,32	1,41	79,68	1673

* – температура воздуха 283К, относительная влажность воздуха 70%. Температуры по зонам: окислительно-восстановительная 1500К, восстановительная 1200К, зона взаимодействия продуктов друг с другом и углеродом топлива 950К.

Таблица 7 - Сухой состав генераторного газа по данным Гинзбурга Д.Б. [9], Лямина В.А. [10], Коллерова Л.К. [11] и Токарева Г.Г. [12].

α	$CO, \%$	$CO_2, \%$	$H_2, \%$	$O_2, \%$	$CH_4, \%$	$N_2, \%$	$Q_H^P, \text{кДж}/\text{м}^3$
Гинзбург Д.Б. [9]. Топливо: хвойные породы (95%) + листв. породы (5%), W=25,5%							
-	28,8	5,6	11,7	0,1	3,3	50,1	6318
Лямин В.А. [10]. Топливо: ель с влажностью W=15-20%							
-	29,5	6,0	7,8	0,8	1,7	54,2	5213
Коллеров Л.К. [11]. Топливо: древесные чурки							
-	19,5	9,8	16,3	1,7	2,5	50,2	5125
Токарев Г.Г. [12]. Топливо: древесные чурки							
-	18-21	8-12	12-17	0,1-0,2	2,5-3,5	50,5-55,5	4467-5756

Таблица 8 - Сухой состав генераторного газа по «Балансово-концентрационному» методу. Топливо: ель с влажностью W=25,5%*

α	$CO, \%$	$CO_2, \%$	$H_2, \%$	$O_2, \%$	$CH_4, \%$	$N_2, \%$	$Q_H^P, \text{кДж}/\text{м}^3$
0,1	30,48	11,40	13,52	0,00	6,06	38,54	7507
0,2	26,80	9,62	11,62	0,00	5,33	46,63	6573
0,21	26,49	9,47	11,47	0,00	5,26	47,31	6493
0,22	26,18	9,33	11,31	0,00	5,20	47,98	6415
0,23	25,88	9,19	11,15	0,00	5,14	48,64	6339
0,24	25,58	9,05	11,00	0,00	5,09	49,29	6264
0,25	25,30	8,92	10,86	0,00	5,03	49,90	6192
0,26	25,02	8,79	10,72	0,00	4,97	50,51	6121
0,27	24,74	8,66	10,57	0,00	4,92	51,11	6051
0,28	24,47	8,54	10,44	0,00	4,87	51,68	5984
0,29	24,21	8,42	10,30	0,00	4,82	52,26	5918
0,3	23,95	8,30	10,17	0,00	4,77	52,81	5853
0,4	21,67	7,28	9,00	0,00	4,33	57,73	5280
0,5	19,75	6,39	7,77	0,00	4,03	62,07	4795
0,6	18,20	5,82	7,03	0,00	3,80	65,16	4436
0,7	16,58	5,23	5,74	0,00	3,72	68,74	4060
0,8	15,41	4,76	5,11	0,00	3,51	71,21	3771
0,9	14,43	4,36	4,63	0,00	3,32	73,25	3526
1,0	13,55	4,01	4,14	0,00	3,17	75,13	3307
1,1	12,79	4,06	2,47	0,53	3,12	77,03	3012
1,2	12,46	4,98	4,02	1,00	2,45	75,09	2897
1,3	11,88	5,21	3,30	1,39	2,32	75,90	2699
1,4	11,26	4,98	2,91	1,74	2,16	76,95	2523
1,5	10,95	5,03	2,70	2,05	2,06	77,21	2425
1,6	10,68	5,11	2,62	2,32	1,95	77,32	2342
1,7	10,44	5,16	2,48	2,57	1,86	77,49	2265
1,8	10,23	5,19	2,34	2,79	1,79	77,67	2194
1,9	10,02	5,21	2,17	2,99	1,73	77,89	2128
2,0	9,84	5,23	2,03	3,17	1,67	78,06	2069
3,0	9,67	5,26	1,90	3,34	1,62	78,23	2015

* –температура воздуха 283К, относительная влажность воздуха 70%. Температуры по зонам: окислительно-восстановительная 1500К, восстановительная 1200К, зона взаимодействия продуктов друг с другом и углеродом топлива 950К.

Заключение

По величине изменения свободной энтальпии (энергии Гиббса) ряда химических реакций процесса газификации древесины проведена оценка химического сродства реагентов, выявлены преобладающие (основные) химические реакции, установлен их приоритет в конкретных

температурных условиях (активных зонах) и найдены доли этих реакций в системе химических превращений.

Вместо общепринятой одной активной зоны обосновано выделение трех активных зон: окислительно-восстановительной, восстанови-

тельной и зоны взаимодействия продуктов между собой и углеродом топлива.

Установленный набор основных химических реакций в трех выделенных активных зонах газификации частично использован в «Балансовой» части предлагаемого метода.

Разработанная «Концентрационная» часть метода позволяет определять концентрации продуктов основных химических реакций в каждой из активных зон по начальным концентрациям исходных веществ или их соединений (газов), температуре и константам равновесия этих реакций.

Разработанный метод определения состава, выхода и теплоты сгорания генераторного газа состоящий из «Балансовой» и «Концентрационной» частей, позволяет достоверно моделировать процесс газификации древесного топлива в газогенераторе обращенного процесса и получать приемлемое согласование расчетных и опытных данных по составу генераторного газа.

Литература

1. Газогенератор твердого топлива: пат. 2579112 РФ.

№2014144242/03; заявл. 31.10.2014; опубл. 27.03.2016, Бюл. № 9.

2. Краткий справочник физико-химических величин. Изд. 8-е, перераб./Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. Л.: Химия, 1983. – 232 с.

3. Иноземцев Н.В. Основы термодинамики и кинетики химических реакций. М.: Военная Академия механизации и моторизации Красной Армии имени Сталина, 1940. – 257 с.

4. Федосеев С.Д., Чернышев А.Б. Полукоксование и газификация твердого топлива. М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной горно-топливной литературы, 1960. – 327 с.

5. Дешалит Г.И. Расчеты процессов газификации топлив. Харьков: Издательство Харьковского Ордена Трудового Красного Знамени государственного университета им. А.М. Горького, 1959. – 167 с.

6. Богданов Н.Н. Полукоксование и газификация торфа. М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1947. – 271 с.

7. Лавров Н.В., Шуригин А.П. Введение в теорию горения и газификации топлива. М.: Издательство академии наук СССР, 1962. – 217 с.

8. Лавров Н.В. Физико-химические основы горения и газификации топлива. М.: Государственное научно-техническое издательство по черной и цветной металлургии, 1957. – 289 с.

9. Гинзбург Д.Б. Газификация низкосортного топлива. М.: Государственное издательство литературы по строительным материалам, 1950. – 173 с.

10. Лямин В.А. Газификация древесины. М.: Лесная Промышленность, 1967. – 263 с.

11. Коллеров Л.К. Газомоторные установки. М., СПб.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1951. – 240 с.

12. Токарев Г.Г. Газогенераторные автомобили. М.: МАШГИЗ, 1955. – 204 с.

© **Е.М. Кашин** - выпускник аспирантуры ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический Университет им. М.Т. Калашникова», KawuH@yandex.ru; **В.Н. Диденко** – д-р. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический Университет им. М.Т. Калашникова», tguug@istu.ru.

УДК 66.021.3

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЕРМОКОНДУКТИВНЫЙ ПИРОЛИЗ ОСИНЫ

Г. Ф. Илалова, М. В. Гизатова, А. Р. Гиматдинова, Д. В. Тунцев, А. Ф. Илалова

В статье рассмотрены изменения массового выхода продуктов, получаемых во время пиролиза в связи с предварительной термической обработкой осины. Экспериментально были получены таблицы и графики с характеристиками, свойствами и составом обработанного древесного материала.

Ключевые слова: пиролиз, термическая обработка, биомасса, биомасло

The article deals with the changes in the mass yield of products obtained during pyrolysis due to preliminary heat treatment of aspen. Tables and graphs with the characteristics, properties and composition of the treated wood material were obtained experimentally

Keywords: pyrolysis, heat treatment, biomass, biooil

Введение

Пиролиз - это термическое разложение биомассы без участия кислорода, являющееся основным термохимическим процессом конверсии биомассы в более полезное топливо. Биомасса нагревается без участия кислорода или частично сжигается в небольшом количестве кислорода, чтобы получить обогащенную углеводородами газовую смесь, масляную жидкость и богатый углеродом твердый остаток. Выход продуктов, полученных при пиролизе биомассы, в основном зависит от химического состава сырья и рабочей температуры [1].

Пиролиз материала применялся еще со времен древнего Египта, при производстве смолы для конопляных лодок и бальзамирующих веществ.

В процессе пиролиза происходит преобразование биомассы в ценные жидкие производные, так называемое биомасло. Полученную в результате биомассу можно затем использовать в качестве топлива или для производства химических веществ и других продуктов на основе биопродуктов [2].

В зависимости от условий, процессы пиролиза можно разделить на три подкласса: обычный пиролиз, быстрый пиролиз и мгновенный пиролиз. В 1980-х годах исследователи обнаружили, что выход пиролизной жидкости может быть увеличен с помощью быстрого пиролиза, когда сырье биомассы нагревается с высокой скоростью, а производимые пары также быстро конденсируются. Быстрый пиролиз используется для получения максимального количества либо жидкости, либо газа в зависимости от установленной температуры процесса [3].

В статье В.С. Куликова, В.В. Литвинова, В.Н. Пиялкина, С. А. Забелкина, В.Н. Башкирова, представлено исследование суммарной пиролизованной смолы методом пиролиза топливной щепы 4 основных пород Северо-Запада России по схеме: пиролиз → конденсация паров → суммарный конденсат → вакуум-обезвоживание конденсата → суммарная смола или бионефть → вакуум-дистилляция бионефти → суммарные древесно-смоляные масла → древесно-смоляной пек [4]. На экспериментальной лабораторной установке производился пи-

ролиз древесины осины, березы, сосны и ели. В результате были сделаны выводы, что каждые из полученных продуктов имеют более высокие показатели теплотворной способности по сравнению с исходным ДБМ. Теплотворная способность масел, исходного жидкого биотоплива и остатка дистилляции примерно одинакова, но масла имеют наибольшую стабильность, так на Ветлужском ЛХЗ древесно-смоляные масла сохраняли свои свойства при хранении 5 – 6 лет.

В работе Усенко А.Ю., Губинского М.В., Федоров С.С. описывается способ переработки биомассы методом окислительного пиролиза [5]. Исследования проводились в специально созданной установке, позволяющей исследовать процесс пиролиза биомассы в потоке горячего воздуха. Процесс пиролиза был описан при помощи математической модели. В результате проведения пиролиза лузги подсолнечника был указан диапазон технологических параметров, обеспечивающих стабильное ведение процесса, а также определены основные факторы, влияющие на их выбор. Интервал рабочих температур при пиролизе составил 230-300°C, при этом расход воздуха менялся в интервале 42-52 м³/ч, расход биомассы – 4-12 кг/ч. Выбранные условия соответствуют диапазону изменения удельного расхода биомассы 0,08-0,18 кг/кг. Максимальное количество выхода летучих продуктов близка к 50 % от исходной биомассы. Таким образом, степень завершенности процесса пиролиза не превышает 70 %. Полученные результаты связаны с тем, что при определении веса коксового остатка, учитывалась масса твердого остатка, поступившего в циклон за весь период процесса, в том числе до установления стационарного режима. Анализ химического состава продуктов пиролиза показал, что доля сгоревшей биомассы не превышает 7 %.

Пиролиз биомассы является термической обработкой, которая приводит к получению древесного угля, жидких и газообразных продуктов. Среди жидких продуктов метанол является одним из самых ценных. Жидкая фракция продуктов пиролиза состоит из двух фаз: водная фаза, содержащая большое количество органических соединений с низким молекулярным весом и неводную фазу, содержащую нерастворимые органические вещества с высокой

молекулярной массой. Причем соотношения уксусной кислоты, метанола и ацетона в водной фазе выше, чем у неводной фазы.

Материалы и методы

В качестве материалов для опыта используется 2700 кг древесной щепы осины размером до 15 мм и влажностью 50%, которая дополнительно измельчается с помощью молотковой мельницы. После измельчения перемолотую стружку просушивают в роторном сушильном барабане при температуре 120-150°C в течении 15 минут, до содержания влаги в массе 4%, а затем хранят в специальных мешках с герметичными пластиковыми вкладышами. Поскольку в результате процессов измельчения и сушки биомасса не является однородной, весь материал из специальных мешков смешивают для получения более единообразного образца. Затем однородную массу, разделенную на образцы с помощью дробильных лопаток, подвергают тепловой обработке при температуре 180, 230 и 270°C с использованием системы непрерывной подачи.

Испытания проводятся на термообработанных материалах для определения содержания влаги, распределения частиц по размерам, объемной плотности, свойств топлива, химического состава, состава золы. Подробный процесс термической обработки древесного сырья в условиях плотного слоя описан в работе В.В. Губернаторова, Р.Р. Шамсиева, О.С. Шарычева [6]. Процесс термообработки осуществляется в герметичной термокамере, которая имеет полный контакт с поверхностью загружаемого контейнера, наполненного сырьем. Перед началом эксперимента биомасса подвергается взвешиванию и загружается в специально изготовленный контейнер. Температура термообработки варьируется в диапазоне от 220 до 260 °C, поддержание данной температуры необходимо поддерживать в течение 2,5 часов. По истечении необходимого времени термокамера подвергается остыванию в течение 12 часов в герметичных условиях, для того чтобы предотвратить процесс возгорания при разгерметизации термокамеры. По окончании эксперимента производится повторное взвешивание материала, в результате которого выяснилось, что термомодифицированная древесная мука легче немодифицированной на 1,7 кг.

Для исследования процесса быстрого термокондуктивного пиролиза растительного сырья разработан и изготовлен эксперименталь-

ный стенд термокондуктивного пиролиза биомассы (рис. 1 и 2). Экспериментальный стенд включает в себя следующие основные элементы: приемный бункер растительного сырья 1, система дозирования 2, состоящая из двух последовательно соединенных секторных питателей, термокондуктивный реактор пиролиза 3, приемник угольной фракции 4, конденсатор 5, приемный резервуар жидких продуктов 6, панель управления экспериментальным стендом 7.

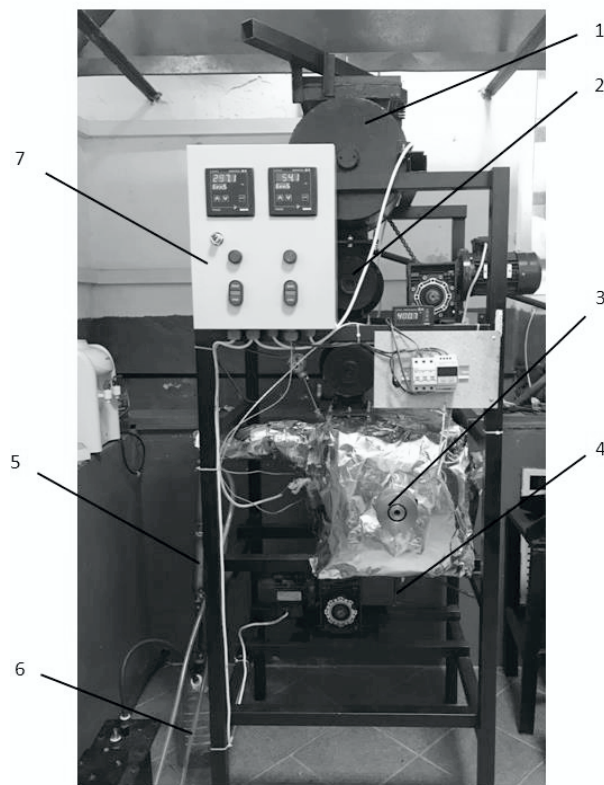


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования термокондуктивного пиролиза растительного сырья

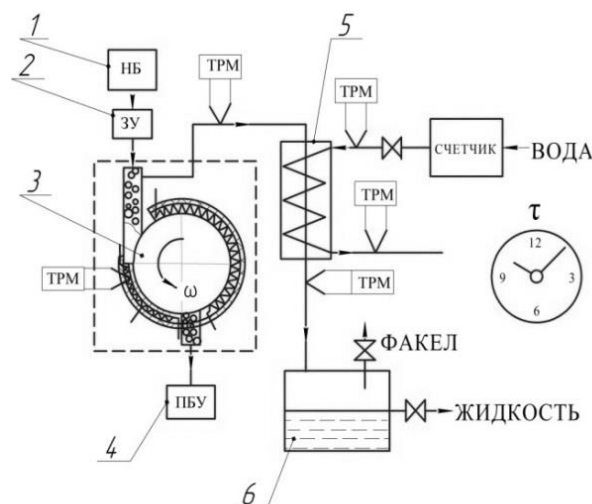


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования термокондуктивного пиролиза древесины.

Экспериментальный стенд для исследования термокондуктивного пиролиза функционирует следующим образом. Из приемного бункера 1 древесное сырье размером до 15 мм и влажностью не более 12% поступает в загрузочное устройство 2, которое обеспечивает непрерывное равномерное его дозирование и при этом гарантирует герметичность процесса от попадания воздуха в зону реакции. Скорость дозирования составляет 5 кг/ч.

После этого сырье попадает в реактор термокондуктивного пиролиза 3, где происходит процесс термического разложения древесины. В основе технологии переработки биомассы лежит процесс передачи тепловой энергии от рабочей металлической поверхности разлагаемому сырью при непосредственном их контакте. Температура пиролиза определяется температурой нагретого металла и составляет 500-550°C. Эффективность разложения характеризуется главным образом температурой поверхности металла и длительностью контакта. Причем механическое воздействие на образец в виде смещения его относительно поверхности нагрева и давления, оказываемого на материал, существенно интенсифицирует процесс разложения. Скорость вращения барабана реактора составляет 2-4 об/мин. В реакторе термокондуктивного пиролиза поддерживается небольшое избыточное давление - до 1000 Па, необходимое для предотвращения попадания кислорода в зону реакции. В результате термического разложения растительного сырья образуется парогазовая смесь и угольный остаток. Угольная фракция собирается в приемнике 4, где происходит ее охлаждение. Полученная парогазовая смесь проходит через конденсатор 5, охлаждается до температуры 30°C, и затем жидкая часть направляется в приемный резервуар 6. Несконденсированные пиролизные газы сжигаются на факеле.

В процессе исследовательской работы на стенде термокондуктивного пиролиза были проведены исследования пиролиза растительной биомассы и получены опытные образцы продуктов разложения осиновой биомассы. Варьируемыми параметрами процесса были скорость подачи сырья, температура в реакторе термокондуктивного пиролиза, скорость вращения вала реактора, температура охлаждения конденсатора, определяемыми параметрами - материальный баланс и состав продуктов терморазложения. С помощью отбора проб был

определен состав парогазовой смеси в различных точках установки.

Результаты

Массовые выходы твердых и жидких сред рассчитывали для каждого образца путем анализа массы жидкости и угля, собранных на общую массу, а выход газа - путем измерения объема отходящего газа во время подачи реактора, измеренного газохроматографией пламенной ионизации и детектором по теплопроводности по интервалам выборок.

Предварительная термическая обработка снижает общий выход жидкости в процессе пиролиза. С увеличением температуры массовый выход жидкости уменьшается, однако массовый выход древесного угля и газа практически не меняется (рис.1).

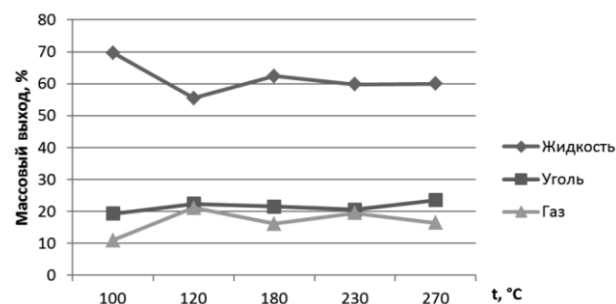


Рис.1. Массовый выход жидкости, древесного угля и газа с увеличением температуры

Сокращение выхода жидкости, предварительно обработанной биомассы, может быть частично объяснено более низким содержанием влаги в поступающем продукте.

Предварительные эксперименты показали, что удельная энергия измельчения стружки осины, высушенной при температуре 120°C, очень чувствительна к скорости подачи материала, поскольку удельная энергия измельчения является фактором мощности измельчения и скоростью подачи материала. Во время эксперимента материал подается в дробилку вручную, чтобы поддерживать скорость и мощность неизменными на протяжении всего этапа измельчения, без забивания шлифовальной камеры. Это может быть сложной задачей для трудно извлекаемых материалов, которые легко закупоривают камеру измельчения и забивают двигатель.

Из результатов пиролиза биомасла, можно сделать вывод, что содержание воды в биомасле, полученной из термически обработанного материала, снижается по сравнению с содержа-

нием древесной муки. В результате в конечном продукте биомасла получается более низкая концентрация воды и меньший процент биомассы, собранной в жидкой фракции. Однако влияние на конечное содержание воды в биомассе или массовый выход жидкой фракции не соотносится с интенсивностью термической обработки. Это соответствует более высокому массовому выходу угля во время процесса пиролиза с предварительной термической обработкой. Сравнивая разные образцы этого исследования, можно заметить, что эти эффекты, наблюдаемые при пиролизе, также обусловлены реакцией гемицеллюлозы на стадии предварительной термической обработки [7].

Как видно из графика, что по мере увеличения температуры, содержание элементарного углерода в биомассе увеличивалось, однако содержание водорода и кислорода уменьшалось (рис.2).

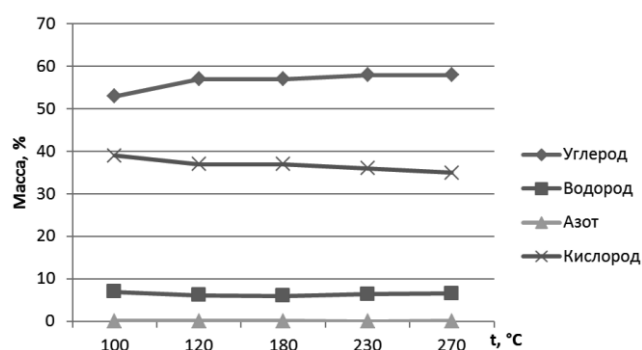


Рис.2. Сухой элементный анализ биомасляного компонента

При оценке этого диапазона термической обработки, на шкале сканера появляются положительные и отрицательные результаты. В то время как общий выход жидкости уменьшился, качество жидкости несколько улучшилось. Однако, поскольку пиролизное масло является промежуточной ступенью в цепочке конверсии для жидких транспортных топлив, существуют другие факторы, которые необходимо учитывать, чтобы определить, может ли предварительная термическая обработка оказывать дополнительное положительное воздействие на качество масла. Трудно в полной мере оценить качество не исследуя биомасло на совместимость с каталитическим гидродеоксигенированием и гидрокрекингом. Однако незначительное дезоксигенирование и снижение содержания кислоты свидетельствует о том, что реакционно способные кислородсодержащие соединения в биомасле, которые затрудняют каталити-

ческое обновление, частично уменьшаются из-за предварительной термической обработки биомассы до пиролиза [8].

Заключение

По итогам выполненной работы, можно сделать вывод, что предварительная термическая обработка практически не влияет на массовый выход продуктов пиролиза. Однако наибольшее влияние оказывает на выход элементного состава биомассы: так содержание углерода увеличивается, водорода и кислорода — уменьшается, а содержание азота остается неизменным.

В настоящее время наблюдается большой интерес к пиролизу биомассы, вследствие того, что твердая биомасса и отходы могут быть легко преобразованы в жидкие продукты. Пиролизные жидкости, такие как сырая биомаслянка или суспензия древесного угля с водой или маслом, имеют преимущества при транспортировке, хранении, сжигании, переоснащении и гибкости в производстве и маркетинге [9]. Получаемый экономический эффект с лихвой окупает затраты на подготовку сырья, его измельчение и процесс сушки. По энергетическим характеристикам новые энергоносители, получаемые в результате быстрого пиролиза большинства органических отходов, не уступают традиционным энергетическим ресурсам: углям, нефти, природному газу. Анализ мирового практического опыта позволяет выделить основные технологии быстрого пиролиза, которые различаются способами передачи тепловой энергии от агента-носителя к исходному веществу.

В будущем ожидается, что термохимическая конверсия будет играть важную роль в преобразовании сырьевой биомассы в качественное сырье, которое соответствует согласованным требованиям. Существуют технические проблемы, которые необходимо решать для термической конверсии, а именно для того чтобы они были внедрены в системы поставок сырья для промышленности [10]:

- типы ресурсов: начальная стадия технологии ограничена древесной биомассой, поскольку сельскохозяйственная биомасса имеет склонность закупоривать технологическое оборудование. Травяные материалы также более склонны к воспламенению или карбонизации во время обработки. Опыт работы с первоначальными коммерческими демонстрационными за-

водами будет иметь решающее значение для нахождения оптимальных технических и экономических условий обработки для различных видов биомассы;

- выбросы: выделяемые газы, в том числе вода, кислотные соединения и смолы могут быть проблематичными для окружающей среды. Необходимы соответствующие технологии для разделения, утилизации и удаления отходов;

- повышение масштабируемости: в то время как проблемы с пропускной способностью и подачей, наблюдаемые в исследованиях меньшего масштаба, могут быть сведены к минимуму путем расширения, другие факторы, такие как однородность обработки продукта могут быть сложными и потребовать изменения процесса;

- проверка процесса: температура, время пребывания и размер частиц являются зависимыми параметрами, которые имеют решающее значение для характеристик термообработки. Оптимальные условия работы могут различаться для разных типов биомассы и должны быть определены опытным путем.

Литература

1. Mohan D, Pittman CU Jr., Steele PH. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuels* 20(3), 848–889 (2006).
2. Czernik S, Bridgwater AV. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy Fuels* 18(2), 590–598 (2004).
3. Demirbas A. Pyrolysis mechanisms of biomass materials. *Energ. Source. Part A* 31(13), 1186–1193 (2009).

4. В.С. Куликов, В.В. Литвинов, В.Н. Пиялкин, С. А. Забелкин, В.Н. Башкиров. Получение и исследование жидких биотоплив из биомассы дерева методом пиролиз // *Вестник Казанского технологического университета*, 2012. С. 197–200.

5. Усенко А.Ю., Губинский М.В., Федоров С.С. Методика исследования процесса пиролиза биомассы в потоке горячего воздуха // *Интегрированные технологии и энергосбережение* 2'2004. С. 130–134.

6. В.В. Губернаторов, Р.Р. Шамсиев, О.С. Шарычев. Термообработка древесной муки в условиях плотного слоя // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2017. № 3. С. 47–51.

7. Bourgeois JP, Doat J. Torrefied wood from temperate and tropical species: advantages and prospects. In: *Bioenergy 84. Proceedings of Conference 15–21 June 1984, Goteborg, Sweden. Volume III. Biomass Conversion*. Egneus H, Ellegard A, Okeefe P, Kristofferson L (Eds). Elsevier Applied Science, London, UK, 153–159 (1984).

8. Tyler L Westover, Manunya Phanphanich, Michael L Clark, Sharna R Rowe, Steven E Egan, Alan H Zacher & Daniel Santosa. Impact of thermal pretreatment on the fast pyrolysis conversion of southern pine, *Biofuels*, 4:1, 45–61, DOI: 10.4155/bfs.12.75

9. Kleinschmidt C. Overview of international developments in torrefaction. Presented at: Central European Biomass Conference. Graz, Austria, 26–29 January 2011.

10. Kleinschmidt C. Overview of international developments in torrefaction. Presented at: Central European Biomass Conference. Graz, Austria, 26–29 January 2011.

© **Г. Ф. Илалова** - магистрант кафедры «Архитектура и дизайна изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»); **М. В. Гизатова** - студент кафедры «Архитектура и дизайна изделий из древесины» ФГБОУ ВО «КНИТУ»; **А. Р. Гиматдинова** - магистрант кафедры «Архитектура и дизайна изделий из древесины» ФГБОУ ВО «КНИТУ»; **Д. В. Тунцев** - канд. техн. наук, доцент кафедры «Переработка древесных материалов» ФГБОУ ВО «КНИТУ»; **А. Ф. Илалова** - студент кафедры «Архитектура и дизайна изделий из древесины» ФГБОУ ВО «КНИТУ».



Навесы



Перила

Кованые решетки



Качели



Люкс Металл

- Широкий ассортимент продукции из металла
- Большой выбор готовых решений
- Создание новых проектов
- Услуги дизайнера
- Гарантия качества
- Короткие сроки исполнения
- Многолетний опыт работы

Лестницы



Ворота



г. Казань, ул. А. Кутуя, д. 163 А

сайт: www.rt-kovka.ru

e-mail: luxmetall@yandex.ru

тел.: (843)240-90-23

8-966-240-90-23

Металлические двери



Заборы



Входные группы



