

# Дерево

ISSN 0011-9008

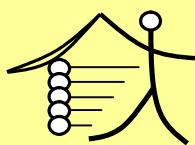
4/2017

обрабатывающая  
промышленность

## БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Дерево символ  
жизни и  
благополучия

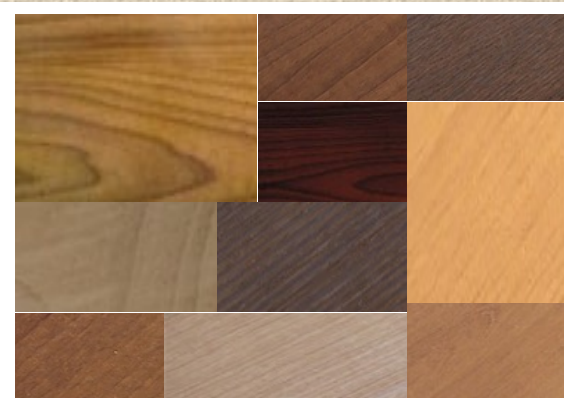


Чистота и сила  
природы поражает

**«Научно-производственное  
предприятие  
«ТермоДревПром»**

Производство новых строительных и декоративных  
материалов на основе термомодифицированной  
древесины

- ✓ Массивная половая доска
- ✓ Фасадная доска
- ✓ Террасная доска
- ✓ Вагонка
- ✓ Клееный щит
- ✓ Клееный брус



**Используемые породы древесины**

**Сосна, береза, дуб, ясень, бук**

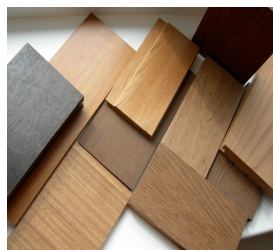
420089, г. Казань, Даурская, д. 41, оф. 3,  
ООО «НПП «ТермоДревПром»

тел. +7 (843) 297-65-53

+7 (843) 231-89-42

[www.npp-termodrev.ucoz.ru](http://www.npp-termodrev.ucoz.ru)

e-mail: [Olambis@rambler.ru](mailto:Olambis@rambler.ru)



# Дерево

ISSN 0011-9008

## обрабатывающая промышленность

4/2017

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ, ЭКОНОМИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

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 ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»



Зам. главного редактора – **Разумов Евгений Юрьевич**, д.т.н., профессор. ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**Сафин Рушан Гареевич**, д.т.н., профессор. ФГБОУ ВПО «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 ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова»

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

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

**Рыкунин Станислав Николаевич**, д.т.н., профессор. ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»

**Семенов Юрий Павлович**, д.т.н., профессор. ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»

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

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

**Черных Михаил Михайлович**, д.т.н., профессор, академик (действительный член) Академии технической эстетики и дизайна. Декан факультета «Реклама и дизайн» ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет им. Калашникова»



**Štefan Barčík**, Prof. ing., Ph.D. – Заместитель главного редактора, ответственный за международную ред. коллегию.  
Vice-dean for Science, Research and Ph.D study  
Department of Machinery Control and Automation  
Faculty of Environmental and Manufacturing  
Technology Technical University in Zvolen, Slovak Republic

**Etele Csanady**, Prof., Dr.  
University of West Hungary

**Nencho Deliiski**, Prof., DSc.  
University of Forestry, Bulgaria

**Ladislav Dzurenda**, Dr. prof.  
Technical University, Slovakia

**Vlado Goglia**, Sc.D., Dr.h.c., prof.  
Department of Process Techniques Faculty of Forestry, University of Zagreb, Croatia

**Ruzica Beljo Lucic**, Prof.  
Faculty of Forestry, University of Zagreb, Croatia

**Alfred Teischinger**, Prof., Dr.  
University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Austria

Директор журнала  
**Хасанин Руслан Ромелевич**  
тел.: 8-927-404-31-85  
e-mail: journal\_woodworking@mail.ru

Директор по рекламе  
**Жданов Сергей Николаевич**  
моб. тел.: 8-987-717-89-98  
e-mail: 458424@mail.ru

«Деревообрабатывающая промышленность», 2017

Свидетельство о регистрации  
СМИ в Роскомпечати № 014990

Сдано в набор 25.12.2017.  
Подписано в печать 27.06.2017.

Формат бумаги 60x88/8  
Усл. печ. л. 8  
Тираж 720 экз. Заказ № 6392  
Цена свободная  
Адрес редакции:  
117303, Москва, ул. Малая  
Юшуньская, д. 1, корп. 1,  
Тел.: 8 904 763 52 89

www.dop1952.ru  
e-mail:  
journal\_woodworking@mail.ru

Подписка:  
journal\_woodworking@mail.ru

Отпечатано в  
ООО «Вертола»

## СОДЕРЖАНИЕ

## ОБРАЗОВАНИЕ

*Брянский государственный инженерно-технологический университет* 3

## НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

### *Физико-механические процессы в деревообработке*

*Харитонов Г.К., Рыкунин С.Н., Кривошеков Н.В.*

Использование параболической зоны круглых лесоматериалов при производстве пиломатериалов 6

*Сафина А.В., Сайфутдинов Д.М., Хайрутдинова А.Р., Валеев К.В.*

Комплексная переработка биомассы березы 11

*Кайнов П.А., Мухаметзянов Ш.Р., Шамсутдинова А.И., Мухтарова А.Р.*

Математическая модель процесса сушки пиломатериала в вакуумной СВЧ установке 17

*Каптелкин А.А., Куликова Н.В., Рыкунин С.Н.*

Технология производства берёзовых пиломатериалов с обзолом для одностороннего мебельного щита 21

*Калимуллин А.А., Назипова Ф.В., Богданов Р.Р.*

Модифицирование цементно-стружечных плит путем введения гиперпластификаторов 27

*Одинцева С.А., Исаков С.Н., Яцун И.В.*

Анализ напряженно-деформированного состояния слоистого материала специального назначения на основе древесины 34

### *Химическая технология древесины*

*Смолин А.С., Дубовой Е.В., Лоренгель М.А., Щербак Н.В.*

Исследования влияния композиции бумаги на основе стеклянных волокон для аппаратов охлаждения воздуха испарительного типа на разрывную прочность и капиллярную впитываемость 40

*Тремасов Е.Н., Губернаторов В.В., Воронин Е.А., Илалова Г.Ф.*

Сверхкритическая экстракция сквалена из семян амаранта 46

*Диденко В. Н., Кашин Е. М.*

Генераторный газ из древесных отходов как альтернатива природному газу в котлоагрегатах 52

*Тремасов Е.Н., Мухтарова А.Р., Сафина А.В., Илалова Г.Ф.*

Сверхкритическая флюидная экстракция пентахлорфенола из пропитанной древесины 57

## Образование

### БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Брянский государственный инженерно-технологический университет** – многопрофильный вуз, который осуществляет обучение по всем уровням (среднее специальное образование – бакалавриат – специалитет – магистратура- аспирантура) и более чем 30 направлениям подготовки.

БГИТУ был организован как лесотехнический институт в соответствии с постановлением СНК РСФСР от 2 июня 1930 г. и решением президиума ВСХНРСФСР от 3 июля 1930 г. Занятия в институте начались 25 января 1931 г.

Институт разместился в историческом здании Дома банков и промышленности (арх. А.З. Гринберг), окончание строительства которого совпало с открытием института, где по сей день располагается лесохозяйственный факультет.

Одновременно, с 10 февраля 1931 г. в институте начал работу рабфак.

В предвоенные годы ВУЗ несколько раз переименовывался: в 1933 году в Брянский лесной институт, в 1940 году в Брянский лесохозяйственный институт.

Директорами института этого периода были: Д.М. Зенин (1930-1936 гг.), Н.Г. Щербович (1936-1937 гг.), Н.В. Карпов (1937-1939 гг.), С.К. Юдин (1939-1942 гг.).

В связи с началом Великой Отечественной Войны и угрозой оккупации г. Брянска

распоряжением Главлесохраны в конце августа 1941 г. институт был переведен в г. Советск, Кировской области. Разместившись на базе Советского лесного техникума, он сразу же возобновил свою работу. Руководство институтом и техникумом 1941-1942 гг. осуществлял А.В. Малиновский.

Многие студенты и преподаватели с первых дней войны ушли на фронт. Героически сражаясь на фронтах, они всеми силами приближали победу. Около 200 человек отдали свои жизни за Родину. Им посвящена мемориальная доска в учебном корпусе на проспекте Ленина и установлен памятник у здания главного корпуса академии.

В годы войны сотни потенциальных абитуриентов оказались на фронте, резко сократился контингент студентов, выпуск специалистов, в 1943 году он составил всего 12 человек.

После освобождения г. Брянска институт возвратился в родные стены, где 19 июня 1944 г. были возобновлены учебные занятия. Резэвакуация осуществлялась под руководством директора института Ф.М. Гурова (1944-1945 гг.). Дальнейшее восстановление института продолжил директор Г.Н. Моисеев (1945-1957 гг.). В 1957 году институт возглавил профессор, доктор сельскохозяйственных наук Всеволод Васильевич Памфилов. Под его руководством в



Здание Дома банков и промышленности, ставшее корпусом БЛТИ (фото 1934 г.)

1960 году институт был реорганизован в многопрофильный политехнический ВУЗ – Брянский технологический институт.

На новой площади был построен современный студенческий городок – учебный корпус, многоэтажное общежитие, стадион, столовая и т.д.

С 1976 по 1988 год институтом руководил профессор, доктор сельскохозяйственных наук Евгений Сергеевич Мурахтанов.

За большие заслуги в подготовке кадров Указом Президента Верховного Совета СССР от 5 августа 1980 г. Брянский технологический институт был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

С 1988 г. по 2002 г. институт возглавлял доцент, кандидат технических наук, заслуженный работник культуры Российской Федерации Леонид Александрович Шахнюк. В связи с развитием ВУЗа в 1995 году Брянский технологический институт был переименован в Брянскую государственную инженерно-технологическую академию.

С 2002 г. по 2011 г. академию возглавлял впервые в истории вуза избранный на альтернативной основе ректор Микрин Владимир Игоревич.

С 2011 г. академию возглавляет ректор Егорушкин Валерий Алексеевич.

В июле 2015 г. Брянская государственная инженерно-технологическая академия стала университетом.

Сегодня Брянский государственный инженерно-технологический университет представляет собой многопрофильное учебное заведение, в состав которого входят 5 факультетов, 32 кафедры, учебно-опытный лесхоз, дендрарий с уникальной коллекцией деревьев и кустарников. Библиотека университета насчитывает около 400 тысяч томов учебной и научной литературы.

В университете создаются все возможности для учебы и творческой работы: оборудованы лаборатории, компьютерные классы, подключенные к сети Интернет, внедряются новые образовательные технологии, базирующиеся на современных информационных и телекоммуникационных возможностях, развиваются базы практик и отдыха.

Брянский государственный инженерно-технологический университет активно развивает международные связи со странами ближнего и дальнего зарубежья. Регулярно проводятся международные конференции, совместно решаются научные проблемы, проводится обмен опытом. Многие ученые ВУЗа являются членами Международных академий.

БГИТУ готовит кадры для лесного хозяйства и лесопромышленного комплекса, промышленного и гражданского строительства, экономических отраслей. Выпускает специалистов в области инженерной экологии, ландшафтной архитектуры, государственного и муниципального управления, технологии деревообработки, строительства автомобильных дорог, производства строительных материалов, технологических машин и оборудования, автомобильного сервиса, информационных систем и многих других направлений, среди которых и эксклюзивные: экономическая безопасность, сметное дело в строительстве, садоводство, энерго- и ресурсо-сберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.

Университет активно развивает международные связи со странами ближнего и дальнего зарубежья. Регулярно проводятся международные образовательные и научные мероприятия, организуется обмен опытом. Учатся студенты различных национальностей и культур.

БГИТУ активно взаимодействует с работодателями Брянщины и других регионов. Ежегодно трудоустраивается подавляющее количество выпускников вуза, которых ценят не только в Брянской области, но и Москве, Санкт-Петербурге, Калужской, Смоленской и других областях нашей страны.

### Институт лесного комплекса, транспорта и экологии

В состав института входят 6 кафедр. Факультет готовит специалистов по профилям:

- 20.03.01 Техносферная безопасность
- 20.03.02 Природообустройство и водопользование («Природоохранное обустройство территорий»)
- 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов («Автомобильный сервис»)
- 35.03.01 Лесное дело («Лесное хозяйство»)
- 35.03.02 Технология лесозаготовительных и  
деревоперерабатывающих производств («Технология  
деревообработки, дизайн мебели и интерьеров»)
- 35.03.10 Ландшафтная архитектура («Ландшафтное  
строительство»)
- 15.04.02 Технологические машины и оборудование
- 20.04.02 Природообустройство и водопользование
- 35.04.01 Лесное дело
- 35.04.09 Ландшафтная архитектура



#### **Направление 35.03.01 Лесное дело по профилю «Лесное хозяйство»**

Срок обучения - 4 года

Квалификация – бакалавр

Выпускающая кафедра «Лесное дело»

Направление «Лесное дело» предусматривает изучение комплекса инженерных, биологических, лесохозяйственных дисциплин, ГИС-технологий и др.

Выпускники данного направления могут работать лесничими, лесоустроителями, лесопатологами, специалистами по выращиванию леса и проектированию лесохозяйственных мероприятий, менеджерами лесного хозяйства, пилотами-наблюдателями авиалесоохраны, в национальных парках и заповедниках, в научно-исследовательских учреждениях. Студенты, хорошо знающие иностранный язык, имеют возможность проходить практику и стажировку в учебных заведениях зарубежных стран.

#### **Направление 35.03.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств по профилю «Технология деревообработки, дизайн мебели и интерьеров»**

Срок обучения - 4 года

Присваиваемая квалификация - бакалавр

Выпускающая кафедра «Технология деревообработки»

Получив квалификацию бакалавр по профилю «Технология деревообработки, дизайн мебели и интерьеров», выпускники занимаются разработкой проектной, проектно-конструкторской и технологической документации для производства всевозможных изделий из древесины и древесных материалов; производственной деятельностью на деревообрабатывающих предприятиях по производству высокохудожественной мебели, паркета, деревянных домов, окон, дверей, лестниц и других изделий из древесины в качестве инженерно-технических работников; организационно-управленческой деятельностью по организации нового производства изделий из древесины или обеспечения эффективного функционирования действующих деревообрабатывающих производств; научно-исследовательской деятельностью при разработке новых дизайнерских решений интерьеров, при проведении теоретических и экспериментальных исследований технологических процессов производства мебели, и изделий из древесины

## ***Физико-механические процессы в деревообработке***

УДК 674.09

# **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ЗОНЫ КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ**

**Г.К. Харитонов, С.Н. Рыкунин, Н.В. Кривошеков**

*Оптимальный объемный выход обрезных пиломатериалов из параболической зоны достигается уменьшением длины обрезных пиломатериалов. Однако в реальных условиях, на современных производствах обрезных пиломатериалов подобный подход оптимизации объемного выхода не всегда эффективен. Это связано с трудностями автоматизации и существенным удорожанием процесса сортировки пиломатериалов длиной от 1 м до 6,5 м. Кроме этого процесс обработки коротких обрезных пиломатериалов требует значительных затрат живого труда*

*Методом имитационного компьютерного моделирования подтверждена гипотеза о том, что если основание блок-хауса в виде прямоугольника будет расположено в пифагорической зоне, а сегментная часть совпадает с профилем поверхности бревна параболической зоны, суммарный объемный выход обрезных пиломатериалов заданных размеров и блок-хауса приближается к максимальным значениям. В результате объемный выход пиломатериалов возрос с 56,77 до 61,32. Ценностный выход увеличился от 1231 до 1739 руб / м<sup>3</sup>.*

**Ключевые слова:** лесоматериалы, пиловочное сырьё, пиломатериалы, обзол, блок-хаус.

*The optimal volume output of edged sawn timber from the parabolic zone is achieved by reducing the length of edging sawn timber. However, in real conditions of sawmill, this approach to optimizing the volume yield is not always effective. This is due to the difficulties of automation and a significant increase in the cost of sorting sawn timber length from 1 m to 6.5 m. In addition, the process of woodworking short edged lumber requires a significant labor cost.*

*The simulation method by computer confirm hypothesis that if the base of the block- house as a rectangle is located in the Pythagoric zone and the segment part coincides with the profile of the surface of the log of the parabolic zone, the total volume yield of the edged sawn timber of the given sizes and the block house approaches the maximum values. As a result, the volume yield of sawn wood increased from 56,77 to 61,32%. The length of all sawn wood products from lumber cant became equal to log length. The valuable yield increased from 1231 to 1739 rubles / m<sup>3</sup>.*

**Keywords:** timber, sawn timber, lumber, wane, block- house.

Технологии по производству пиломатериалов можно квалифицировать по величине объемного выхода.

Технология, обеспечивающая объемный выход обрезных пиломатериалов 53-60%. Для реализации этой технологии используют оборудование для продольного деления круглых лесоматериалов и брусьев: линии на базе лесопильных рам, круглопильных станков, вертикальных ленточнопильных станков. Отличительной особенностью этой технологии является производство пиломатериалов длиной от 1 м и более, в ряде случаев длиной от 0.5м. Наиболее распространенный способ распиловки - с брусковкой [1,3,4,13,15]. Эта технология используется не только на средних и крупных

предприятиях, но и на предприятиях с объемом производства до 25 тыс. м<sup>3</sup> пиломатериалов в год [18]. Отличительной особенностью этой технологии является распиловка по одному поставу круглых лесоматериалов 2-4 чётных диаметров, что приводит к уменьшению объемного выхода. При таких объемах производства (до 25 тыс.м<sup>3</sup> ) используются линии на базе круглопильных станков, одноэтажевых лесопильных рам, вертикальных и горизонтальных ленточнопильных станков [16,19].

Технология на базе фрезернопильных линий [17]. Отличительной особенностью этой технологии является объемный выход обрезных пиломатериалов от 48% до 50% и длиной 3 м и

более. Эта технология является наиболее прогрессивной, но её использование в Российской Федерации сдерживается низкими ценами на технологическую щепу. Объемный выход технологической щепы на 5-10 % выше за счет уменьшения объемного выхода пиломатериалов. В связи с этим актуальным является увеличение объемного выхода пиломатериалов на фрезернопильных линиях за счет более полного использования параболической зоны бревен. Одним из путей увеличения использования параболической зоны является производство в ней блок – хауса.

В настоящее время при производстве пиломатериалов переработка горбыля переносится на отдельную линию, на которой из него, как правило, вырабатываются пиломатериалы [6-9,14]. Для переработки горбыля разработано значительное количество отечественного оборудования. Подтверждение этому является значительное количество патентов направленных на переработку горбыля [10-12]. Недостатком такого подхода является сортировка горбыля по толщине, что требует значительных затрат живого труда. Одним из возможных путей решения этой задачи совершенствования технологии является выработка такой продукции, форма поверхности, которой совпадает с поверхностью бревна. К такой продукции относится блок-хаус. Была выдвинута гипотеза о том, что если основание блок-хауса в виде прямоугольника будет расположено в пифагорической зоне, а сегментная часть совпадет с формой профиля поверхности бревна параболической зоны, суммарный объемный выход обрезных пиломатериалов заданных размеров и блок-хауса приближается к максимальным значениям. Для подтверждения этой гипотезы использовались методы компьютерного имитационного моделирования. Если прямоугольник блок-хауса вписывается в параболическую зону, то длина блок-хауса будет меньше длины бревна. При этом надо учитывать, что блок-хаус должен иметь одно сечение в поставе, чтобы была возможность формировать сушильный пакет. Параболическая зона находится за границей пифагорической зоны, которая видно на рис.1 [1].

Размер пифагорической зоны  $A_{кр}$  определяется по формуле:

$$A_{кр} = \sqrt{1,5 * d^2 - 0,5 * D^2} \quad (1)$$

где  $d$  – толщина бревна в верхнем торце, мм;  
 $D$  – толщина бревна в комлевом торце, мм.

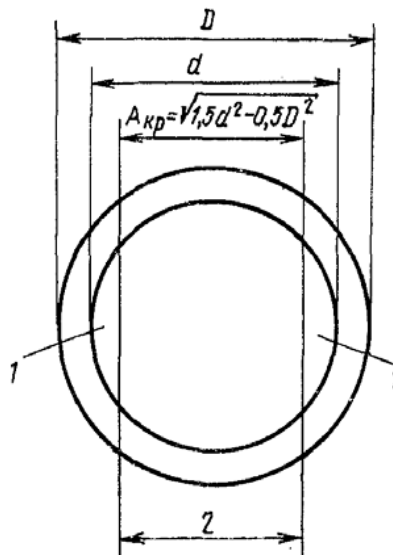


Рис. 1. Зоны вершинного торца бревен при распиловки их вразвал на обрезные доски: 1 – параболическая – выработка коротких досок, 2 – пифагорическая – выработка досок равных длине бревен

Для объекта компьютерного имитационного моделирования было выбрано бревно  $d=22$  см длиной  $L=6$  м со сбегом 1 см/м. Для данного бревна  $A_{кр}=91,4$  мм. Способ распиловки с брусковой по следующему поставу: 1 проход  $\frac{150}{1} - \frac{19}{2}$ , 2 проход  $\frac{50}{2} - \frac{19}{2} - \frac{19}{2}$  на обрезные пиломатериалы. [2,5] Результаты работы сведены в таблице 1.

Для подтверждения гипотезы во время процесса имитационного моделирования поставка на втором проходе вместо досок толщиной 19 мм и длиной 5 м включаем основание блок-хауса толщиной 10 мм. Результаты работы сведены в таблице 2.

Следует отметить, что на этом месте вырабатывалась доски 5 м, а блок-хаус получается длиной 6 м равный длине сегмента.

Далее в полученный постав добавляем сегмент блок-хауса (рис.2). Для определения объема блок – хауса необходимо определить площадь сегмента.

Площадь сегмента находится по формуле:

$$S = \frac{1}{2} * R^2 * (\alpha - \sin \alpha) \quad (2)$$

где  $R$  – радиус бревна, м,  $\alpha$  – угол сегмента, град.

Угол сегмента определяется по формуле:

$$\alpha = 2 * \sin^{-1} \frac{c}{2R}$$

где  $c$  – хорда сегмента,  $R$  – радиус бревна.

На блок-хаус цена обычно устанавливается за  $1 \text{ м}^2$  с увеличением толщины его цена

возрастает. Пересчитав цену блок - хауса за  $1 \text{ м}^3$  можно констатировать, что связь цены за  $1 \text{ м}^2$  и цены за  $1 \text{ м}^3$  носит практически функциональный характер. Коэффициент корреляции близок к 1. Отсюда следует, что блок-хаус производится в основном из обрезных пиломатериалов, а его цена формируется в зависимости от цены на обрезные пиломатериалы (таблица 3).

Таблица 1 - Определение размеров и объемного выхода пиломатериалов при распиливании с брусковой

| № | Диаметр бревна, d, см | Длина бревна, L, м | Объем бревна, V, м³ | Количество досок, п, шт | Толщина досок, t <sub>д</sub> , мм | Расход ширины полупостава до пласти, E, мм | Расстояние от оси постава до пласти, а, мм | Номинальная ширина доски, b <sub>д</sub> , мм | Номинальная длина доски, l <sub>д</sub> , м | Объем одной доски, V <sub>д</sub> , м³ | Общий объем досок, V <sub>общ</sub> , м³ | Общий расчетный объемный выход пиломатериалов, P, % | Общий фактический объемный выход |
|---|-----------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------|
|   | 1                     | 2                  | 3                   | 4                       | 5                                  | 6                                          | 7                                          | 8                                             | 9                                           | 10                                     | 11                                       | 12                                                  | 13                               |
| 1 | 22                    | 6                  | 0,28                | 1                       | 150                                | 76,4                                       | 76,4                                       | 158,28                                        | 6                                           |                                        |                                          |                                                     |                                  |
| 2 |                       |                    |                     | 2                       | 19                                 | 23,2                                       | 99,6                                       | 100                                           | 5                                           | 0,0095                                 | 0,019                                    | 6,79                                                | 6,65                             |
| 3 |                       |                    |                     | 2                       | 50                                 | 53,3                                       | 53,3                                       | 150                                           | 6                                           | 0,045                                  | 0,09                                     | 32,14                                               | 31,5                             |
| 4 |                       |                    |                     | 2                       | 19                                 | 23,2                                       | 76,5                                       | 150                                           | 6                                           | 0,0171                                 | 0,034                                    | 12,21                                               | 11,97                            |
| 5 |                       |                    |                     | 2                       | 19                                 | 23,2                                       | 99,7                                       | 100                                           | 5                                           | 0,0095                                 | 0,019                                    | 6,79                                                | 6,65                             |
| 6 | Итого                 |                    |                     |                         |                                    |                                            |                                            |                                               |                                             |                                        | 0,162                                    | 57,93                                               | 56,77                            |

Таблица 2 - Определение размеров и объемного выхода основания блок-хауса при распиливании с брусковой

| № | Диаметр бревна, d, см | Длина бревна, L, м | Объем бревна, V, м <sup>3</sup> | Количество досок, n, шт | Толщина досок, t <sub>д</sub> , мм | Расход ширины полупоставы до пласти, E, мм | Расстояние от оси поставы до пласти, а, мм | Номинальная ширина доски, b <sub>д</sub> , мм | Номинальная длина доски, l <sub>д</sub> , м | Объем одной доски, V <sub>д</sub> , м <sup>3</sup> | Общий объем досок, V <sub>общ</sub> , м <sup>3</sup> | Общий расчетный объемный выход пиломатериалов, P, % | Общий фактический объемный выход пиломатериалов, P <sub>ф</sub> , % |
|---|-----------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
|   | 1                     | 2                  | 3                               | 4                       | 5                                  | 6                                          | 7                                          | 8                                             | 9                                           | 10                                                 | 11                                                   | 12                                                  | 13                                                                  |
| 5 | 22                    | 6                  | 0,28                            | 2                       | 10                                 | 14                                         | 90,5                                       | 120                                           | 6                                           | 0,0072                                             | 0,0144                                               | 5,14                                                | 5,04                                                                |
| 6 | Итого                 |                    |                                 |                         |                                    |                                            |                                            |                                               |                                             |                                                    | 0,157                                                | 56,28                                               | 55,16                                                               |

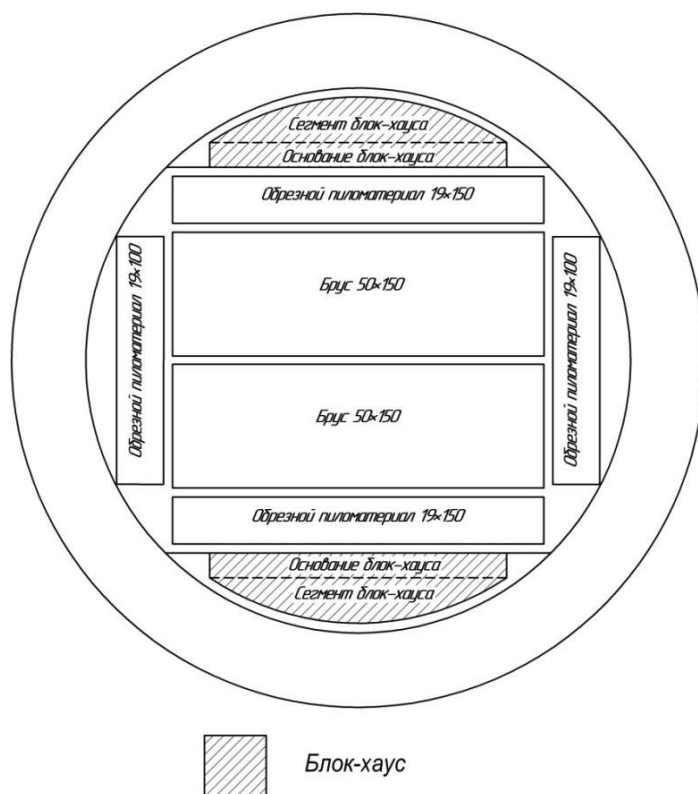


Рис. 2. Схема поставка раскроя бревна диаметром 22 см, длиной 6 м на обрезные пиломатериалы и блок-хаус

Таблица 3 - Сравнение ценностного выхода обрезных пиломатериалов и блок-хауса

| № | Радиус бревна, R, мм                                        | Толщина горбыля, t, мм                          | Ширина горбыля, b, мм                                         | Толщина доски в основании, h, мм             | Длина горбыля, l, м                           | Толщина сегмента, h <sub>i</sub> , мм | Угол сегмента, α, град.            | Площадь сечения элемента в основании, S <sub>o</sub> , м <sup>2</sup> | Площадь сегмента, S <sub>c</sub> , м <sup>2</sup> | Общая площадь сечения блок-хауса, S <sub>общ б-х</sub> , м <sup>2</sup> | Площадь основания блок-хауса, S, м <sup>2</sup> |
|---|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|   | 1                                                           | 2                                               | 3                                                             | 4                                            | 5                                             | 6                                     | 7                                  | 8                                                                     | 9                                                 | 10                                                                      | 11                                              |
| 1 | 110                                                         | 29                                              | 120                                                           | 10                                           | 6                                             | 19                                    | 66,14                              | 0,0012                                                                | 0,0014                                            | 0,0026                                                                  | 0,72                                            |
| 2 | 115                                                         | 34                                              | 135                                                           | 10                                           | 5                                             | 24                                    | 71,92                              | 0,0014                                                                | 0,002                                             | 0,0034                                                                  | 0,68                                            |
| 3 | 120                                                         | 39                                              | 150                                                           | 10                                           | 4                                             | 29                                    | 77,4                               | 0,0015                                                                | 0,0027                                            | 0,0042                                                                  | 0,6                                             |
| 4 | 125                                                         | 45                                              | 150                                                           | 10                                           | 3                                             | 35                                    | 73,78                              | 0,0015                                                                | 0,0033                                            | 0,0048                                                                  | 0,45                                            |
|   | Объем элемента в основании, V <sub>д</sub> , м <sup>3</sup> | Объем сегмента, V <sub>c</sub> , м <sup>3</sup> | Общий объем блок-хауса, V <sub>общ б-х</sub> , м <sup>3</sup> | Цена блок-хауса сорта А, руб./м <sup>2</sup> | Цена блок-хауса сорта ВС, руб./м <sup>2</sup> | Цена блок-хауса сорта А, руб./шт.     | Цена блок-хауса сорта ВС, руб./шт. | Цена доски обрезной, руб./м <sup>3</sup> .                            | Цена блок-хауса сорта А, руб./м <sup>3</sup>      | Цена блок-хауса сорта ВС, руб./м <sup>3</sup>                           |                                                 |

Продолжение табл. 3

|   | 12     | 13     | 14      | 15  | 16  | 17         | 18    | 19   | 20       | 21       |
|---|--------|--------|---------|-----|-----|------------|-------|------|----------|----------|
| 1 | 0,0072 | 0,0087 | 0,0159  | 445 | 345 | 320,4      | 248,4 | 7800 | 20157,47 | 15627,7  |
| 2 | 0,0068 | 0,01   | 0,0168  | 530 | 430 | 357,7<br>5 | 290,3 | 7800 | 21286,36 | 17270,07 |
| 3 | 0,006  | 0,0107 | 0,01678 | 605 | 490 | 363        | 294   | 7800 | 21626,34 | 17515,55 |
| 4 | 0,0045 | 0,0099 | 0,0144  | 680 | 550 | 306        | 247,5 | 7800 | 21229,19 | 17170,67 |

Таблица 4 - Определение размеров и объемного выхода пиломатериалов и блок - хауса при распиливании с брусковой.

| N | Диаметр бревна, d, см | Длина бревна, L, м | Объем бревна, V, м³ | Количество досок, n, шт | Толщина досок, t <sub>д</sub> , мм | Расход ширины<br>полупоставы до пласти, E, | Расстояние от оси поставы<br>до пласти, а, мм | Номинальная ширина<br>доски, b <sub>д</sub> , мм | Номинальная длина<br>доски, l <sub>д</sub> , м | Объем одной доски, V <sub>д</sub> , м³ | Общий объем досок, V <sub>общ</sub> ,<br>м³ | Общий расчетный<br>объемный выход | Общий фактический<br>объемный выход |
|---|-----------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
|   | 1                     | 2                  | 3                   | 4                       | 5                                  | 6                                          | 7                                             | 8                                                | 9                                              | 10                                     | 11                                          | 12                                | 13                                  |
| 1 | 22                    | 6                  | 0,28                | 1                       | 150                                | 76,4                                       | 76,4                                          | 158,28                                           | 6                                              |                                        |                                             |                                   |                                     |
| 2 |                       |                    |                     | 2                       | 19                                 | 23,2                                       | 99,6                                          | 100                                              | 5                                              | 0,0095                                 | 0,019                                       | 6,79                              | 6,65                                |
| 3 |                       |                    |                     | 2                       | 50                                 | 53,3                                       | 53,3                                          | 150                                              | 6                                              | 0,045                                  | 0,09                                        | 32,14                             | 31,5                                |
| 4 |                       |                    |                     | 2                       | 19                                 | 23,2                                       | 76,5                                          | 150                                              | 6                                              | 0,0171                                 | 0,034                                       | 12,21                             | 11,97                               |
| 5 |                       |                    |                     | 2                       | 29                                 | 33,5                                       | 110                                           | 120                                              | 6                                              | 0,016                                  | 0,032                                       | 11,43                             | 11,2                                |
| 6 | Итого                 |                    |                     |                         |                                    |                                            |                                               |                                                  |                                                |                                        | 0,175                                       | 62,57                             | 61,32                               |

### Литература

1. Аксенов, П.П. Теоретические основы раскря пиловочного сырья / П. П. Аксенов. – М.-Л.: Гослесбумиздат, 1960. – 216 с.
2. Крылов, Г.В. Методы экспериментальной оптимизации в деревообработке: учеб.пособие / В. Г. Крылов, В. Е. Пятков. – М.,2013.- 34с.
3. Рыкунин, С.Н. Планирование раскря пиловочного сырья и расчет производительности поточных линий: учеб.пособие / С. Н. Рыкунин, В. Е. Пятков. – М.,2011.-80 с.
4. Фергин, В.Р. Актуальные вопросы теории раскря пиловочного сырья:

учеб.пособие / В. Р. Фергин, О. И. Шако, О.И. Ерхова. – М.,2010. – 95с.

5. Рыкунин, С.Н. Методы составления и расчета поставов: учеб.пособие / С. Н. Рыкунин, В. Е. Пятков. – 3-е изд., - М., 2008. – 76 с.

6. Фомин, А.А. Получение обрезных строганных пиломатериалов из горбыля по новой технологии его обработки / А.А. Фомин, В.Г. Гусев // Деревообрабатывающая промышленность, 2007. - №2. – С.7 - 10.

7. Фомин, А.А. Формирование фасонной поверхности заготовки из материала с неоднородными свойствами / А. А. Фомин // Технология машиностроения, 2013. - №5. – С. 19-23.

8. Фомин, А.А. Методология построения процесса механической обработки периферийных сегментов / А. А. Фомин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2013. - №5. - С. 170 – 176

9. Фомин, А.А. Обоснование параметров процесса механической обработки периферийного сегмента / А. А. Фомин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2014. - №2. - С. 68 – 73.

10. Пат. 44279 Российская Федерация, МПК В 27 С 1/08. Станок для обработки горбыля / Фомин А. А., Гусев В. Г.: заявл. 29. 10. 2004; опубл. 10. 03. 2005. Бюл. № 7.

11. Пат. 2279973 Российская Федерация, МПК В27С 1/00. Способ обработки горбыля / Фомин А. А., Гусев В. Г.: заявл. 28. 10. 2004; опубл. 20. 07. 2006. Бюл. № 20.

12. Пат. 95589 Российская Федерация, МПК В27С 1/00. Станок для первичной обработки горбыля / Фомин А. А., Гусев В. Г.: заявл. 11. 03. 2010; опубл. 10. 07. 2010. Бюл. № 19.

13. Уласовец, В.Г. Рациональный раскрой пиловочника: моногр. / В. Г. Уласовец, - Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. - С 9 – 29.

14. Дьякова, А.С. Переработка горбылей – путь к увеличению выхода пилопродукции. / Научное творчество молодежи – лесному

комплексу России: Материалы XI Все рос. Науч. – техн. конф. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2015 – Ч1. 236- 237с.

15. Старкова, А.В. Раскрой параболической зоны бревна на заготовки / А. В. Старкова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2004. - №5. - С. 83 – 89.

16. Nzokou, P., Wood waste processing and utilization in Southeastern Michigan // Department of Forestry, Michigan State University East Lansing. - 2009. - 50 p.

17. Vuorilehto, J., doctor thesis Size control of sawn timber by optical means in breakdown saw machines / Vuorilehto J. // Helsinki University of Technology, Department of Forest Products Technology, Laboratory of Wood Technology. – 2001. – 180 p.

18. Olufemi, B., Lumber recovery efficiency among selected sawmills on Akure, Nigeria / Olufemi B., Olalekan Akendeni J., Oluyinka Olaniran S. // Drvna Industrija - 2012. – 15 – 18 p.

19. Linder, B., master thesis Determining optimal primary sawing and ripping machine settings in the wood manufacturing chain / Linder B. // Department of Industrial Engineering, University of Stellenbosh, South Africa. – 2014. – 164 p.

© Г.К. Харитонов - магистрант ФГБОУ ВО «МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана научно-исследовательский институт», кафедры древесиноведения и технологии деревообработки; С.Н. Рыкунин – д.т. н., профессор кафедры древесиноведения и технологии деревообработки rikunin@mgul.ac.ru ФГБОУ ВО «МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана научно-исследовательский институт»; Н.В. Кривошеков – аспирант кафедры древесиноведения и технологии деревообработки ФГБОУ ВО «МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана научно-исследовательский институт», krivoshekov-n@yandex.ru.

УДК 676.031:54-112

## КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА БИОМАССЫ БЕРЕЗЫ

А.В. Сафина, Д.М. Сайфутдинов, А.Р. Хайрутдинова, К.В. Валеев

*В статье приведен обзор наиболее распространенных направлений переработки биомассы березы, в частности, таких как получение из нее березового сока, выделение биологически активных веществ из бересты и листьев березы, применение бересты и капа в качестве материала для декоративно-прикладного искусства, использование витаминсодержащего экстракта из березового гриба-чаги и, наконец, использование древесины для технологической переработки. Представлены разработанная лабораторная установка для комплексной переработки отходов березы и результаты экспериментов. Установлена актуальность и перспективность березовой породы в качестве сырья для технологической обработки и химической промышленности.*

**Ключевые слова:** береза, бетулин, переработка, компоненты

*In the article the review of the most widespread directions of processing of birch biomass, in particular, such as obtaining of birch sap from it, isolation of biologically active substances from birch bark and leaves, application of birch bark and cap as a material for arts and crafts, use of vitamin-containing extract from birch mushroom-chaga and, finally, the use of wood for technological processing. A laboratory plant for complex processing of birch waste has been developed and an experiment has been carried out. The actuality and prospects of birch rock as a raw material for technological processing and chemical industry are established.*

**Keywords:** birch, betulin, processing, components.

## Введение

Все части березы по-своему уникальны, так как содержат различные ценные древесные компоненты или же используются в технологической переработке. Береста служит ценным источником бетулина, дегтя и других компонентов. Издавна является материалом для декоративного искусства. Листья березы, которые в большинстве случаев утилизируются, служат отличным источником эфирных масел. Чага является кладом полезных компонентов, которые ценятся в медицине. Древесина березы, помимо технологической переработки, также пригодна для получения березового сока. Отдельно стоит отметить капы, из которых получают дорогую и редкую древесину [1].

Древесина березы поступает на рынок в качестве пиломатериалов, фанеры и шпона. Строганный шпон в свою очередь активно используется в производстве мебели. Для этой же цели используется шпон с волнистым или узорчатым рисунком. Береза используется в изготовлении паркета. Некачественная древесина березы служит отличными дровами, особенно для розжига камина, так как березовые дрова почти не искрят и выделяют приятный запах, ввиду наличия в них эфирных масел [2].

Березовый сок содержит до 2% сахара, а также целый набор полезных компонентов. Обычно он используется в качестве напитка, имеющего множество лечебных свойств. Применяется в медицине, как средство для укрепления волос [3]. Используется в качестве напитка при разнообразных болезнях дыхательной системы, включая туберкулез, при камнях в почках и жёлчном пузыре, подагре, ревматизме, отёках, незаживающих ранах и язвах. Березовый сок является отличным природным средством для улучшения обмена веществ [4].

Кап – нарост на дереве с деформированными направлениями роста волокон древесины. Из капов получают очень необычную древесину со сложной текстурой

волокон, одну из самых ценных за свою красоту и редкость, что делает её ещё более дорогой. Разнообразие текстуры капов обусловлено условиями произрастания деревьев, равнинной или горной местностью. Это делает рисунок капов неповторимым и разнообразным, из-за чего древесина капов востребована художниками и скульпторами [5]. Существует большое разнообразие хорошо известных типов капа, их используют для изготовления шпона, предметов интерьера, бижутерии, рам картин, хозяйственных предметов, рукояток ножей, настольных игр, во внутреннем оформлении автомобилей и для мелких поделок. Древесина капа очень трудна для обработки на токарном станке или ручным инструментом из-за неоднородности и неравномерности направления роста волокон. При этом закрученные волокна в период роста капов уплотняют друг друга, делая древесину некоторых капов очень прочной [6].

Кора березы разделяется на внешний (береста) и внутренний (луб) слои. Береста – это природный материал, отличающийся белым наружным слоем. В нашей полосе, а также северной части России бересты в избытке и с ее добычей не возникает проблем. Береза на этой территории является крайне распространенным деревом. Береста состоит из волокон, которые в свою очередь образуют слои. Эти слои формируются каждый год жизни березы и по ним, соответственно, можно судить о возрасте дерева. Береста, имеет необычный состав – она содержит множество экстрактивных веществ, извлекаемых органическими растворителями и щелочами. В связи с этим она представляет большой потенциальный интерес для химической переработки с целью получения новых продуктов и биологически активных веществ. Береста довольно устойчива к изменению своей формы. Это свойство особенно заметно у подвергшейся обработке качественной бересты. Изделия из бересты (рис.1), получаемые плетением, несмотря на заданную геометрическую форму, имеют плавные очертания. Такая эластичность

обусловлена слоями бересты. Слои бересты позволяют противостоять износу, растяжению и разрушению, однако здесь важно учитывать направление волокон, так как прочностные показатели бересты вдоль волокон значительно превосходят прочность при поперечном изгибе. Продольная прочность бересты увеличивается пропорционально ее толщине, что позволяет изготавливать бытовые предметы, устойчивые к деформации и износу. Каждый слой бересты слегка отличается по оттенку от других и тем самым дает широкие возможности в декорировании изделий. Самым ценным для декорирования является внутренний слой бересты. Он же лицевой. Этот слой сильно различается цветом по сравнению с другими слоями. Он окрашен в желтые, красные и оранжевые цвета и обладает бархатной поверхностью. Контрастные сочетания лицевого и остальных слоев открывают мастеру яркую палитру цветовых решений при создании высокохудожественных изделий. Береста обладает водоотталкивающим свойством, поэтому применяется для производства посуды, транспортировки жидкостей. Входящие в состав бересты вещества позволяют сохранять ее ценные свойства на протяжении многих лет. Минус этого материала – горючесть [7]. Береста легко воспламеняется и горит с большим выделением тепла и дыма. Изделия из бересты крайне уязвимы к нагреванию, при нагреве они начинают деформироваться в виде скручивания. Береста применяется в декоративно-прикладном искусстве в качестве материала для производства бытовых предметов, сувениров и украшений, а также для художественного декорирования.



Рис. 1. Изделия из бересты

Известны такие ремесла как плетение, резьба, производство обуви и сувениров [8]. В промышленности береста используется для

получения биологически активных веществ, таких как бетулин, суберин, деготь и многие другие компоненты. Фармакологический спектр действия бетулина очень широк. При лечении кожных заболеваний он оказывает противовоспалительное, антибактериальное и ранозаживляющее действие. Эти свойства бетулина были неоднократно доказаны многочисленными опытами. В самых последних исследованиях были выявлены его антиопухолевые, гепатопротекторные и противовирусные свойства. Доказано, что бетулин заметно останавливает воспалительный процесс путем воздействия на регулирующие медиаторы иммунной системы [9]. Стандартными экспериментами были подтверждены противовоспалительные и антибактериальные свойства. Это вещество также регенерирует поврежденные ткани. Бетулин характеризуется широким спектром антивирусной активности. В настоящее время продолжают исследования по возможному использованию бетулина в борьбе против ВИЧ инфекции. Особенно актуально применение бетулина для больных гепатитом С. Многие косметические компании добавляют бетулин в свои продукты для ухода за кожей в качестве тонизирующего и регенерирующего средства. Уже больше десяти лет ведутся исследования бетулиновой кислоты, для использования ее в препаратах для лечения рака кожи. Бетулин способствует дифференциации клеток кожи, способствует заживлению ран и помогает восстановить защитный кожный слой, гармонизировать и нормализовать нарушенные функции кожи при кожных заболеваниях. Доказанным является факт уничтожения бетулином бактерии *Mycobacterium*, вызывающей туберкулез. Кроме того, доказано, что бетулин также останавливает размножение грибов в организме. Также успешно бактерициды бетулина убивают возбудителей брюшного тифа, туберкулеза и дифтерии [10]. Из бересты также добывается деготь. Применяется в качестве смазки для трущихся деталей различных конструкций и для повышения влагостойкости. Но самым приоритетным всегда было использование березового дегтя в качестве лечебного средства. Перечень болезней, при которых применяют это средство довольно большой:

- различные кожные заболевания (большим спросом пользуется дегтярное мыло);
- грибковые заболевания;

- болезни горла, легких и дыхательных путей;
- катаральный цистит;
- болезни суставов.

Березовый деготь может послужить отличным антисептиком для защиты ран и ожогов от гниения. В этом случае он ещё и ускорит процессы регенерации, улучшит кровообращение и омолодит кожу. Хорошим примером является мазь Вишневского.

Листья березы имеют богатый химический состав, который по большей части представлен эфирными маслами, но также в нем присутствуют спиртосодержащие компоненты, витамин С, каротин, танины и прочие [11]. Отвар из березовых листьев применяется как дезинфицирующее и антисептическое средство, мочегонный и желчегонный препарат. Настой из березовых листьев более насыщенный, поэтому его используют для местного лечения. Спиртовые и эфирные вещества, которые содержат листья березы обладают антимикозным и противовирусным действием. Танины, которыми богаты березовые листья, имеют бактерицидные и противовоспалительные свойства. Фитонциды и флавоноиды относятся к антиоксидантам, поглощающим свободные радикалы, поэтому листья березы могут омолаживать клетки и ткани, восстанавливать их. Полезные свойства листьев березы делают их ценным лечебным сырьем [12].

Чага – это березовый гриб (рис. 2). Она обладает противомикробными и антисептическими свойствами. Входящие в её состав вещества – настоящие природные биогенные стимуляторы.



Рис. 2. Березовый гриб (чага)

Благодаря имеющимся в ней органическим кислотам, уникальный гриб оказывает терапевтическое воздействие на организм, регулирует и нормализует соотношение водородных и гидроксильных ионов в организме. Березовый гриб очень ценен в качестве лечебного сырья [13]. Приём отваров и настоек улучшает состояние больных при опухолях, полезные компоненты способствуют укреплению иммунитета. В начальной стадии развития рака средства чаги задерживают рост раковых клеток. Плодовое тело чаги имеет в своем составе щавелевую, муравьиную, уксусную кислоты, полисахариды, клетчатку, смолы, которые улучшают аппетит, устраняют боли. Стерины снижают количество холестерина в крови. Чага обладает противовоспалительными и кровоостанавливающими свойствами. Дубильные вещества, содержащиеся в ней, способны сворачивать белок, способствуют образованию защитной пленки на слизистых поверхностях органов [14].

В Республике Татарстан на данный момент не осуществляется комплексная переработка отходов березы, при том, что такие предприятия как ЗФЗ, ПФМК активно используют березовую породу в производстве. При этом в процессе лесозаготовки образуется большое количество древесной зелени, а в процессе переработки хлыстов образуются отходы в виде коры. Комплексная переработка березы позволит организовать высокорентабельное производство. Но на данный момент привлекательным и перспективным является получение биологически активных веществ из экстракта чаги и наружного слоя бересты, в особенности бетулина. Именно они представляют собой наибольшую экономическую и технологическую ценность.

### Методы и материалы

Начаты исследования в области получения биологически активных веществ из березы. Для этих целей создана установка, предназначенная для переработки отходов березы в виде листьев и коры (рис.3).

Установка включает в себя экстрактор 2, конденсатор 5, флорентину 6, буферную емкость 7. Экстрактор состоит из теплоизолированной емкости 3, крышки 4, датчика температуры 1, регулятора температуры 8, нагревательного элемента 9 и корзины для древесного сырья 10.

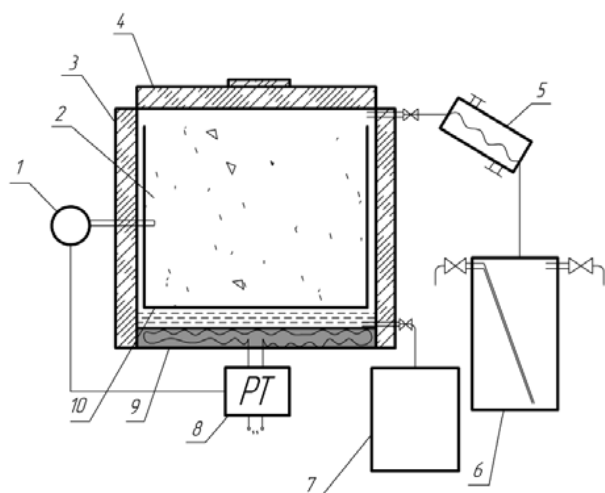


Рис. 3. Установка для комплексной переработки отходов березы

При переработке древесной зелени, дно экстрактора заливают водой и помещают в него корзину с древесной зеленью. Включают нагревательный элемент, конденсатор, регулятор температуры с датчиком. Воду нагревают до температуры кипения. Пар проходит через древесную зелень, вбирая в себя экстрактивные вещества и попадает в конденсатор. Конденсат собирается в флорентине, с помощью которой осуществляют сепарацию эфирных масел от воды.

При переработке коры, измельченную бересту помещают в корзину. Экстрактор заполняется спиртовым раствором. Затем включаются нагревательный элемент, конденсатор, регулятор температуры с датчиком. Образующийся в процессе кипения пар, конденсируется в флорентине. По завершении процесса, корзину вытаскивают и выпариванием выделяют бетулин из раствора.

Была проведена серия экспериментов для установления оптимальных параметров экстракции бетулина из бересты. Использовались фракции измельченной высушенной бересты размерами 5 мм и 3 мм, этиловый спирт концентрацией с 80, 85, 90, 95%. Экстракцию проводили при температуре кипения растворителя 80°C.

### Результаты

В таблице 1 показаны результаты исследования влияния концентрации этилового спирта на растворимость бетулина.

Таблица 1 - Зависимость растворимости бетулина от концентрации спирта

| Концентрация этилового спирта, % | Растворимость бетулина при температуре кипения растворителя |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 95                               | 5,15                                                        |
| 90                               | 5,27                                                        |
| 85                               | 5,35                                                        |
| 80                               | 3,55                                                        |

В пределах концентрации 85-95 % разница в результатах незначительна, однако при дальнейшем понижении концентрации растворимость резко падает.

В табл. 2 показаны результаты исследования влияния размера фракций измельченной бересты на коэффициент извлечения бетулина.

Таблица 2 - Зависимость коэффициента извлечения бетулина от размера частиц

| Номер опыта | Выход бетулина, % от массы абс.сух.бересты |              |
|-------------|--------------------------------------------|--------------|
|             | Фракция 5 мм                               | Фракция 3 мм |
| 1           | 17,9                                       | 23,9         |
| 2           | 18,9                                       | 21,6         |
| 3           | 18,7                                       | 22,4         |
| Среднее     | 18,5                                       | 22,6         |

Наибольший выход продукта получается при использовании фракций размером 3 мм, однако оптимальным общепринятым значением считается 5 мм. Это обусловлено тем, что получение малых размеров сырья приводит к значительному увеличению расхода электроэнергии. Также усложняется технологический процесс, так как образуется много мелких частиц засоряющих оборудование.

На рис.4 показано изменение содержания бетулина в бересте в процессе экстракции.

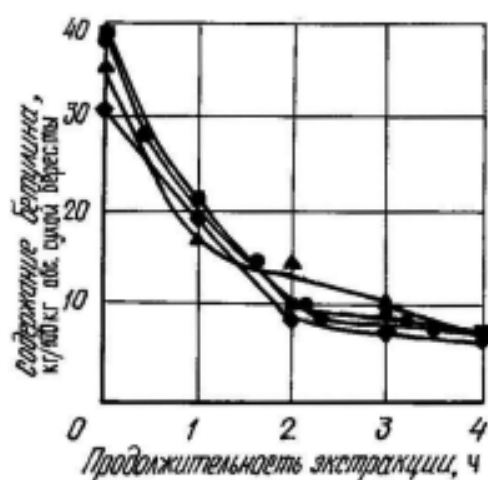


Рис. 4. Влияние продолжительности экстракции на содержание бетулина в бересте

Как видно из графиков наиболее интенсивное выделение бетулина приходится на первый час экстракции. Это то количество бетулина, которое находится на поверхности коры. По прошествии часа эксперимента, содержание бетулина в бересте плавно снижается. Это объясняется извлечением его из внутренних слоев частиц. Разницы в результате 3 и 4 часа практически нет.

### Заключение

Серия опытов ставилась с целью определения оптимальных решающих параметров процесса экстракции бетулина из бересты. К таким параметрам относятся температура и продолжительность процесса, размер фракций, концентрация спирта. Температура кипения используемого этилового спирта изменяется в пределах 78-80 %, то есть имеются незначительные различия и, соответственно, наблюдается минимальное влияние на ход процесса. Таким образом, очевидно, что самой оптимальной температурой для экстракции является 80°C и подтверждать это посредством проведения опыта не представляется необходимым. Самым оптимальным значением концентрации этилового спирта выбрано 85%, так как при больших значениях результат не увеличивается, и даже может оказаться менее удовлетворительным. При меньших значениях растворимость резко снижается. Оптимальным размером фракций выбрано 5 мм. Данное решение принято исходя из соображений экономической эффективности и продуктивности процесса. Фракции измельченной сухой бересты размером 5 мм.

обладают достаточной степенью измельчения для высокого выхода бетулина и позволяют проводить технологический процесс без повышенных энергозатрат и затруднений, связанных с загрязнением оборудования. Оптимальная продолжительность процесса экстракции данной фракции составляет 3 часа. Именно за это время извлекается практически весь бетулин как с поверхности коры, так и из ее внутренних слоев.

### Литература

1. Данченко, А.М. Популяционная изменчивость березы / А.М. Данченко // Новосибирск: Наука Сибирское отделение. 1990. Т.3 с. 197-202.
2. Корчагина, И.А. Семейство берёзовые (Betulaceae) / И.А. Корчагина // Жизнь растений. 1980. Т.5. Ч.1. с. 311-324.
3. Дербина, М.Г. Заготовка березового сока / М.Г.Дербина, В.М. Дербин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т.3. с. 127-130.
4. Маркварт, В.Р. Эколого-биологическая характеристика березы бородавчатой и березы пушистой в Северном и Центральном Казахстане / В.Р. Маркварт // Автореф. дис. ... канд. биол. наук: (03.00.05), 1978. с.17-21.
5. Синадский, Ю.В. Береза, ее вредители и болезни / Ю.В. Синадский // М.: Наука, 1973, Т.4. с. 205-208.
6. Kim, T.V. Elementary structure of birch bark and dry extract. / T.V. Kim, I.I. Ivanova, M.A. Khanina, A. P. Rodin, O. R. Grek // Pharmaceutics. 2011. Т.1, № 3. Р. 27-30.
7. Кислицын, А.Н. Экстрактивные вещества бересты: выделение, состав, свойства, применение. / А.Н. Кислицын // М.: Химия, - 1994.Т.1 с.266
8. Караманский, С.А. Плетеные изделия. / С.А. Караманский // М.: «Экология», 1992 г. с.172.
9. Толстиков, Г.А. Бетулин и его производные. Химия и биологическая активность / Г.А. Толстиков, О.Б. Флехтер, Э.Э. Шульц // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. №13. с. 2-7.
10. Черняева, Г.Н. Экстрактивные вещества берёзы / Г.Н. Черняева, С.Я. Долгодворова, С.М.Бондаренко // Академия наук СССР, Сибирское отд-ние, Ин-т леса и древесины им. В.Н. Сукачева, 1986, с.117-122
11. Разумов, Е.Ю. Древесная зелень: рациональное использование. / Е.Ю. Разумов,

А.Е. Воронин, Ф.В. Назипова, П.А. Кайнов // «Деревообрабатывающая промышленность». 2015, № 2. с. 8-11.

12. Сафин, Р. Р. Повышение эффективности экстракции эфирных масел водяным паром / Р. Р. Сафин, А.Е.Воронин, Ф.В.Назипова, Л.В. Ахунова // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, №8. с. 151-154.

13. Сафина, А. В. Интенсификация процесса водной экстракции чаги путем

периодического понижения давления среды / А.В. Сафина, В.В. Губернаторов, Р.Р. Гараев, Е.Ю. Разумов // «Деревообрабатывающая промышленность». 2017, № 2. с.12-15.

14. Шигабиева, Ю.А. Получение дезодорантов - антиперспирантов с экстрактами чаги. / Ю.А. Шигабиева, С.А. Богданова, М.А. Сысоева // Вестник технологического университета. 2015. Т.18, №18. с. 16-18.

© **А.В. Сафина** - к.т.н., доцент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»; **Д.М. Сайфутдинов** - магистр кафедры «Переработка древесных материалов» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [whatalovelyday@mail.ru](mailto:whatalovelyday@mail.ru); **К.В. Валеев** – магистр кафедры «Переработка древесных материалов» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [kirval116@mail.ru](mailto:kirval116@mail.ru); **А.Р. Хайрутдинова** - магистр кафедры «Переработка древесных материалов» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [hayrutdinova1995@mail.ru](mailto:hayrutdinova1995@mail.ru);

УДК 674.047.3

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛА В ВАКУУМНОЙ СВЧ УСТАНОВКЕ

П.А. Кайнов, Ш.Р. Мухаметзянов, А.И. Шамсутдинова, А.Р. Мухтарова

*В данной статье была исследована математическая модель процесса сушки древесины в вакуумной СВЧ установке. Автором представлена формализация модели влагопереноса и теплопередачи. Выявлено, что сушка древесины вакуумно-микроволновым способом, по сравнению с обычной горячей воздушной сушкой, регулируется периодом постоянной скорости.*

**Ключевые слова:** сушка; математическое моделирование; микровакuum; древесина.

*The article was investigated a mathematical model of the process of drying wood in a vacuum microwave plant. The author presents the formalization of the model of moisture transfer and heat transfer. It is revealed that the drying of wood in a vacuum-microwave manner, in comparison with the usual hot air drying, is regulated by a period of constant speed.*

**Keywords:** drying; mathematical modeling; microwavevacuum; wood.

### Введение

Сушка является наиболее энергоемкой и трудоемкой операцией процесса производства пиломатериалов. В настоящее время более 80% произведенных пиломатериалов сушат в обычных и вентиляционных печах, где горячий и сухой воздух принудительно циркулирует по штабелированным пиломатериалам. Несмотря на то, что эта операция достаточно проста и эффективна, продукция часто получается невысокого качества и затрачивается много времени на процесс, особенно для твердых пород древесины.

При применении СВЧ нагрева древесины в вакуумной среде наряду с высокой скоростью

переноса тепла достигается высокое качество высушенных пиломатериалов. Это связано с тем, что энергия поглощается по всему объему, и тепло вырабатывается непосредственно внутри высушиваемого материала. Перепад влажности по толщине составляет не более 3,0-3,5 %, а условный показатель остаточных напряжений - не более 1-2 %. При этом удельная подводимая мощность энергии не должна превышать 0,1 Вт/см<sup>3</sup>[1].

С тех пор, как в 1950-х и 1960-х годах были опубликованы первые научные доклады о вакуумной СВЧ сушке древесины, за последние 50 лет было проведено много исследований, изучающих характеристики сушки древесины в

микроволновой печи. Среди соотечественников, которые внесли значительный вклад в развитие теории и практики вакуумно-высокочастотной сушки, следует выделить А.И. Расева, А.А. Горяева, Н.Ю. Попова, А.В. Нетушила. Благодаря их трудам разработаны конструкции вакуумно-высокочастотных камер, отлажены режимы сушки отдельных пород древесины, научно обоснована возможность применения комбинированной конвективно-вакуумно-высокочастотной сушки. В России разработкой промышленных сушильных СВЧ установок занимались А.М. Бомбин, В.П. Галкин, Ф.Х. Гареев, А.И. Расев и другие [2].

Бомбин А.М., Скуратович Н.В., Недорезова Е.В. разработали и запатентовали устройство для СВЧ сушки материалов. Применение данной установки позволяет сократить продолжительность сушки древесины за счет использования принудительного воздухообмена в камере и повторного применения горячего воздуха для подогрева материала. В результате возможности контролировать параметры воздушной среды достигается высокое качество сушки, в том числе трудносохнущих пород и мореного дуба [3].

Известны так же публикации зарубежных авторов [1,4-9].

Антти [4] исследовал и сравнил влияние некоторых факторов на процесс сушки в микроволновой печи, включая проницаемость древесины, размер и количество пор, внутреннее давление пара и температуру. В 1995 году он сообщил, что максимальную скорость сушки и влажность 0,2-0,5% в минуту можно получить при микроволновой сушке сосны и ели. Было выявлено изменение цвета внутри некоторых образцов.

Гуанбен [5] исследовал характеристики СВЧ-сушки древесных нитей с различной исходной геометрией содержания влаги при различных потребляемых мощностях.

В последние годы ряд исследований, проведенных Сейфартом [6] и Лейкером [7] показал, что комбинированное применение микроволновой печи и вакуума может дать лучшее качество сушки и очень высокую скорость даже при низкой температуре процесса (до 40°C). Во время вакуумной СВЧ сушки процесс настолько быстр, что может исчисляться даже в минутах.

## Формализация модели

Для упрощения модели процесса СВЧ сушки древесины были сделаны следующие допущения:

1. Влажная древесина представляет собой капиллярно-пористую среду, состоящую из древесной матрицы, свободной воды, сорбционной воды и водяного пара, которые считаются непрерывными фазами.

2. Во время вакуумной СВЧ сушки размер и внутренняя структура древесины не изменяется.

3. Движение влаги внутри древесины может происходить под действием градиента влагосодержания, градиента температуры и градиента избыточного давления, по уровню влажности она может быть с начальной влажностью ниже и выше предела насыщения клеточных стенок.

4. Предполагается, что скорость движения свободной воды и водяного пара соответствует закону Дарси.

5. Во время вакуумной СВЧ сушки, воздушная масса незначительна из-за непрерывного вакуума; парциальное давление водяного пара равно общему давлению в просвете, и водяной пар определяется как идеальный газ.

6. При создании и решении модели предполагается рассмотрение одномерной картины, в которой тепло и влажность передаются в направлении наименьшего размера.

7. Локальное тепловое равновесие поддерживается среди паров, свободной жидкой воды и сорбционной воды внутри древесной клетки.

## Математическая модель

Одномерная математическая модель, выраженная дифференциальными уравнениями с частными производными для описания переносов влаги и тепла в древесине с влажностью выше предела насыщения клеточных стенок, может быть представлена как:

$$p_s \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( p_l \frac{K_l K_{rl}}{\mu_l} \frac{dP_l}{dx} + p_v \frac{K_v K_{rv}}{\mu_v} \frac{dP}{dx} \right), \quad (1)$$

$$p_{c_p} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T) + q - m_l r_l. \quad (2)$$

Во время вакуумной СВЧ сушки при содержании влаги в древесине ниже предела насыщения клеточных стенок отсутствует постоянная свободная вода, а сорбционная вода или прерывистая свободная вода в древесине испаряется до просвета, а затем переносится из древесины ядра к поверхности древесины в виде водяного пара.

В этой связи модель, выраженная дифференциальным уравнением с частными производными для описания переноса влаги в древесине при влажности ниже предела насыщения клеточных стенок, может быть описана как:

$$p_s \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( p_v \frac{K_v K_{rv}}{\mu_v} \frac{\partial P}{\partial x} \right). \quad (3)$$

Если теплопередача, вызванная миграцией влаги и разницей скрытой теплоты испарения между сорбционной водой и свободной водой, не учитывается, то общий тепловой баланс можно записать как:

$$p c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda_{eff} \nabla T) + q - m r. \quad (4)$$

Для решения вышеприведенных математических моделей для тепловых и материальных балансов требуются краевые условия.

Начальные условия принимаются равными известной начальной влажности и начальной температуре древесины по всему сечению материала, поэтому начальные условия выражаются как:

$$M(x, 0) = M_0, \quad (5)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad (6)$$

Граничные условия переноса тепла и влаги выражаются следующим образом:

$$p_v v_v = a_m (P_A - P_0), \quad (7)$$

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} = a_T (T_A - T_0). \quad (8)$$

Для симметричной модели переноса массы и тепла условия равновесия в центральной части материала выражаются как:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (9)$$

В данном исследовании в уравнениях начальных и граничных условий коэффициент влагообмена между поверхностью древесины и окружающей средой ( $a_m$ ), который составляет  $8,9 \times 10^{-9}$  кг/(м<sup>2</sup>Па·с) определялся экспериментально. Средняя паропроницаемость древесины, высушенной с помощью вакуумной СВЧ сушки составляла 0,5 Дарси [8]; коэффициент теплообмена  $a_T$  равен 12 Вт (м<sup>2</sup>·°C) [9]. Для численного исчисления также использовались следующие данные:

$$P_s = 390 \text{ кг/м}^3; T_0 = 20 \text{ °C}; s = 25 \text{ мм}; P_0 = 20 \text{ МПа}.$$

Процесс вакуумной СВЧ сушки древесины можно смоделировать путем решения численного уравнения для тепла и массы с использованием метода конечных разностей.

### Оборудование и материалы

Проверка математической модели на адекватность была осуществлена с помощью микроволновой печи с номинальной мощностью 800 Вт и частотой 2450 МГц, помещенной в вакуумную камеру. В качестве образцов использовались сосновые пиломатериалы размерами 50 мм x 200 мм x 300 мм, базисной плотностью 390 кг/м<sup>3</sup> и начальной влажностью около 60%, торцы которых были обработаны масляной краской, чтобы исключить перенос влаги вдоль волокон древесины. Далее образец взвешивался и для замера температуры в центр материала устанавливалась термопара. После этого образец закладывался на электронные весы, установленные в СВЧ-печи. Вакуум с помощью вакуумного насоса поддерживался на уровне абсолютного давления 20 кПа. В ходе эксперимента, показания массы и температуры в центре образца регистрировались каждые 20 мин.

### Результаты

На рис. 1 представлены расчетные кривые и экспериментальные данные изменения влажности и температуры древесины, высушенной при вакуумной СВЧ сушке, с различной удельной мощностью СВЧ энергии (100, 140 и 180 кВт/м<sup>3</sup>). Из рисунка, видно, что с повышением мощности СВЧ – излучения повышается температура и сокращается время сушки. Причем повышение температуры материала вызывает интенсификацию не только термовлагопроводности, но и молярного

переноса влаги за счет возрастания внутреннего давления в материале. Чем больше удельная мощность микроволнового излучения, тем выше общее давление в просвете клеток и общая разность между внутренней и наружной поверхностью древесины, поэтому скорость

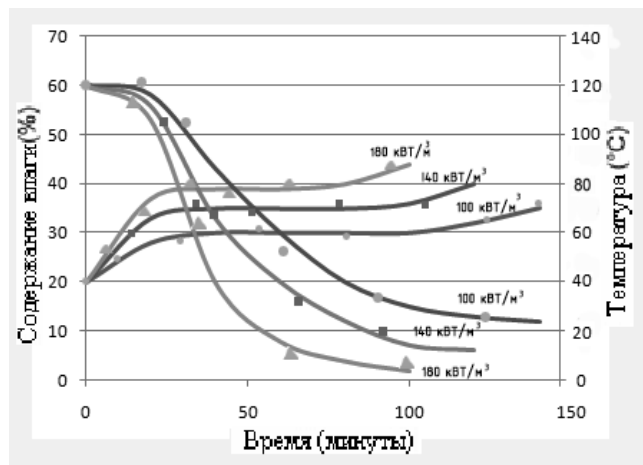


Рис. 1. Расчетные кривые сушки, и экспериментальные данные для различных уровней мощности СВЧ-энергии

Из анализа экспериментальных данных и теоретических кривых показывают, что процесс вакуумной СВЧ - сушки можно делить на три классических периода: (I) период прогрева, (II) период постоянной температуры и скорости сушки, (III) период нагрева с пониженной скоростью сушки. Причем все периоды описываются математической моделью с достаточной для подобных расчетов точностью. Расхождения между расчетными и экспериментальными данными не превышают 23%.

### Заключение

В данном исследовании для описания процессов вакуумной СВЧ сушки на основе механизма тепловлагопереноса в древесине была разработана и проверена одномерная математическая модель. На практике, чтобы улучшить точность моделирования модели, некоторые соответствующие параметры должны быть скорректированы при изменении условий сушки, начального влагосодержания, плотности входной мощности микроволн.

### Номенклатура

|       |                               |
|-------|-------------------------------|
| $c_p$ | Удельная теплота (Дж/кг·К)    |
| $K$   | Внутренняя проницаемость (м²) |
| $K_r$ | Относительная проницаемость   |

движения влаги через взаимосвязанные пустоты внутри древесины, из-за общей разности давлений, в значительной степени возрастает. Взаимный эффект этих двух факторов приводит к значительному уменьшению времени сушки с увеличением мощности СВЧ-излучения.

|     |                                                      |
|-----|------------------------------------------------------|
| $s$ | Половина толщины древесины (м)                       |
| $M$ | Содержание влаги (%)                                 |
| $m$ | Скорость испарения на единицу объема среды (кг/м³·с) |
| $p$ | Давление (Па)                                        |
| $q$ | Удельная мощность СВЧ излучения (Вт/м²)              |
| $r$ | Скрытая теплота парообразования (Дж/кг)              |
| $T$ | Температура (°C)                                     |
| $t$ | Время (с)                                            |

### Греческие символы

|               |                                        |
|---------------|----------------------------------------|
| $\alpha_m$    | Коэффициент влагообмена (кг / м²·Па·с) |
| $\alpha_T$    | Коэффициент теплообмена (Вт/м²°C)      |
| $\lambda$     | Коэффициент теплопроводности Вт/(м·К)  |
| $\mu$         | Вязкость (Па·с)                        |
| $\rho/\rho_s$ | Плотность и базисная плотность (кг/м³) |

### Индексы

|       |                        |
|-------|------------------------|
| $eff$ | Эффективный показатель |
| $l$   | Свободная вода         |
| $s$   | Древесная матрица      |
| $v$   | Пар                    |

### Литература

1. Тетерин Л.А., Паничев Г.П. Процесс сушки лесоматериалов с применением энергии СВЧ// Окна.Двери.Витражи.-2006.-№6.
2. Гареев Ф.Х.Нетрадиционная сушка древесины:вакуумная и СВЧ.//Лесная промышленность.-2004.-№5.-63 с.
3. Бомбин А.М., Скуратович Н.В., Недорезова Е.В. Патент на изобретение RUS 2189549 20.09.2002.
4. Antti, A.L. Microwave drying of hardwood: Simultaneous measurements of pressure, temperature, and weight reduction. Forest Products Journal 1992, 42 (6), 49–54.
5. Guanben, D.; Siqun, W.; Zhiyong, C. Microwave drying of wood strands. Drying Technology 2005, 23, 2421–2436.
6. Seyfarth, R.; Leiker, M.; Mollekopf, N. Continuous drying of lumber in a microwave vacuum kiln. In 8th International IUFRO Wood

Drying Conference, Vol. 8; Romania, 2003; 159–163.

7. Leiker, M.; Aurich, K.; Adamska, M.A. Accelerated drying of single hardwood boards by combined vacuum-microwave application. 9th International IUFRO Wood Drying Conference, Vol. 8; Nanjing, China, 2005; 185–190.

8. Bao, F.C.; Lv, J.X. Studies on the fluid permeability of wood of the main Chinese species. *Scientia Silvae Science* 1992, 28 (3), 237–246.

9. Datta, A.K.; Ni, H. Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. *Journal of Food Engineering* 2002, 51, 355–364.

© **П.А. Кайнов** – к.т.н., доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»; **Ш.Р. Мухаметзянов** – к.т.н., доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [joker775.87@mail.ru](mailto:joker775.87@mail.ru); **А.И. Шамсутдинова** – магистрант кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»; **А.Р. Мухтарова** – магистрант кафедры «Архитектура и дизайна изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

УДК 674.093

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕРЁЗОВЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ С ОБЗОЛОМ ДЛЯ ОДНОСТОРОННЕГО МЕБЕЛЬНОГО ЩИТА

**А.А. Каптелкин, Н.В. Куликова, С.Н. Рыкунин**

*При разработке технологии производства параметры берёзовых пиломатериалов должны способствовать увеличению объёмного выхода ламелей для клеёного щита. Для этого следует решить следующие задачи: производить пиломатериалы обрезными – это позволит с меньшими затратами автоматизировать их сортировку и укладку в сушильные пакеты и, в дальнейшем, раскраивать на ламели, улучшить заполнение сушильных камер, сократить затраты живого труда, увеличить объёмный выход ламелей из заболонной зоны, так клеёный щит, включающий ложное ядро в настоящее время пользуется меньшим спросом и цена на него существенно ниже. Две поставленные задачи имеют противоречия. Производство обрезных пиломатериалов уменьшает размер заболонной зоны в пиломатериалах, а при производстве клеёного щита требуется её увеличение. В связи с этим выдвинута гипотеза о значительном увеличении объёмного выхода обрезных пиломатериалов из необрезных за счёт увеличения использования сбеговой зоны путём уменьшения по толщине при обрезке пропиленной части кромки.*

**Ключевые слова:** пиломатериалы, мебельный щит, лесоматериалы

*When developing woodworking technology, the parameters of birch lumber should aid increase the volume output of lamellas for the edge glued panels. For this, you should solve the following tasks: to produce sawn timbers - this will allow to automate their sorting and stowing in drying stacks and, in the future, cut out on lamellas. This way will reduce investment, improve the filling of drying chambers, reduce human factors. Increase the volume output of lamellas from the sap-wood zone, because the demand on edge glued panels including the false core is reduced. These two tasks are contradictory. The production of edged sawn wood reduces the size of the sap-wood zone in the sawn lumbars, and the production of the edge glued panels requires its increase. In this regard, a hypothesis has been put forward on a significant increase in the volume output of edged sawn timber from unedged timber by increasing the use of the taper zone by reducing the thickness of the cut edge of the sawn edge.*

**Keywords:** lumber, furniture board, timber

Берёзовые лесоматериалы пользуются спросом при производстве фанеры. При этом используется лучшая комлевая часть хлыста. Объёмный выход сортиментов для производства фанеры составляет 18...20% от

объёма берёзового хлыста. Из оставшейся части хлыста производятся сортименты для производства пиломатериалов. Их объём составляет 20...25%. Доля сортиментов для производства пиломатериалов имеет тенденцию

к сокращению, что позволяет повышать их качество. Средний диаметр круглых лесоматериалов для производства пиломатериалов остаётся невысоким. Около 80% сортиментов имеют диаметр 14...20 см.

Одним из путей решения задачи эффективной переработки древесины берёзы, может быть изменение схемы обрезки пиломатериалов в лесопильном цехе с оставлением в верхней части доски тупого обзола, параметры которого превышают требования действующих стандартов (рис. 1).

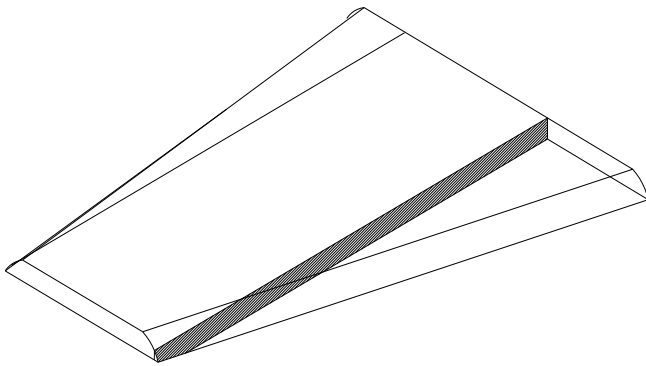


Рис. 1. Схема раскроя необрезных пиломатериалов, на обрезные

Такие пиломатериалы возможно использовать при производстве мебельного щита.

Отходы в обзольную и сбеговую рейку можно определить по формуле [1]:

$$K_n = K_{обз} K_{сб} \quad (1)$$

где  $K_{обз}$  - коэффициент, учитывающий отходы в обзольную рейку;  $K_{сб}$  - коэффициент, учитывающий отходы в сбеговую рейку;  $K_n$  - коэффициент, учитывающий отходы обзольные и сбеговые рейки.

$$K_{обз} = F_T / F_n = \frac{b_c(x_2 - x_1)}{2 \int_{x_2}^{x_1} y dx} \quad (2)$$

где  $F_T$  - площадь поперечного сечения обрезной доски трапецидального вида по пласти на середине длины;  $F_n$  - площадь поперечного сечения необрезной доски на середине длины;  $b_c$  - средняя ширина доски трапецидального вида;  $r$  - радиус бревна;  $x_1$  - расстояние от оси до внутренней пласти доски, мм;  $x_2$  - расстояние от оси до наружной пласти доски, мм.

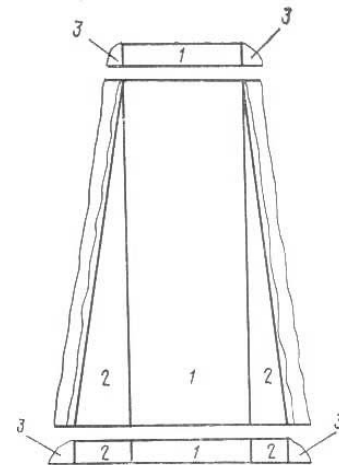


Рис. 2. Схема раскроя необрезной доски на обрезную: 1- обрезная доска; 2- сбеговая рейка; 3- обзольная рейка

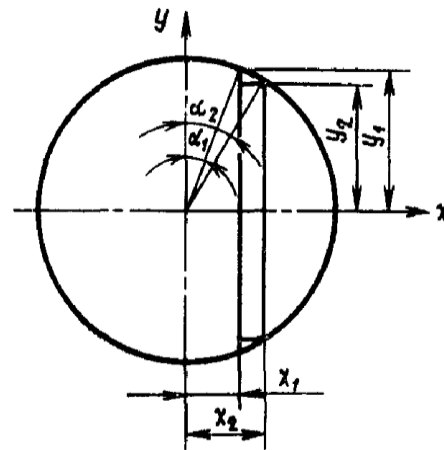


Рис. 3. Схема расчёта  $K_{обз}$

Коэффициент использования необрезных досок ( $K_{сб}$ ), который учитывает использование сбеговой зоны в зависимости от диаметра и сбега брёвен, местоположение досок в поставе по отношению к центру торца бревен и от количества заготовок, выражен формулой:

$$K_{сб} = 1 - \frac{2 b_n}{2 b_n + S L} \quad (3)$$

где  $b_n$  - ширина наружной пласти доски в верхнем отрезе, мм;  $b_n$  - ширина наружной пласти доски в комле, мм;  $S$  - сбега, см/м;  $L$  - длина доски, м.

При разработке технологии производства параметры берёзовых пиломатериалов должны способствовать увеличению объёмного выхода ламелей для клеёного щита. Для этого следует решить следующие задачи:

1. Производить пиломатериалы обрезными - это позволит с меньшими затратами автоматизировать их сортировку и укладку в сушильные пакеты и, в дальнейшем, раскраивать на ламели. Улучшить заполнение

сушильных камер, сократить затраты живого труда [3].

2. Увеличить объёмный выход ламелей из заболонной зоны, так клеёный щит, включающий ложное ядро в настоящее время пользуется меньшим спросом и цена на него существенно ниже [2, 4, 5].

Две поставленные задачи имеют противоречия. Производство обрезных пиломатериалов уменьшает размер заболонной зоны в пиломатериалах, а при производстве клеёного щита требуется её увеличение.

В связи с этим выдвинута гипотеза о значительном увеличении объёмного выхода обрезных пиломатериалов из необрезных за счёт увеличения использования сбеговой зоны путём уменьшения по толщине при обрезке пропиленной части кромки [6,8,9,10,11,12]. Для проверки этой гипотезы круглые лесоматериалы диаметром 14...20 см раскаивались вразвал и с брусковкой на обрезные пиломатериалы стандартных размеров [7], обрезные пиломатериалы свободной ширины и длины, обрезные пиломатериалы стандартных размеров с обзолом пропиленная кромка в которых составляла 5мм, обрезные пиломатериалы с обзолом свободной длины и ширины. Толщина всех пиломатериалов – 25 мм. Размеры пиломатериалов определялись для влажности 5-7%.

На рис. .4. представлены нумерация досок в поставах при распиловке вразвал и брусковкой.

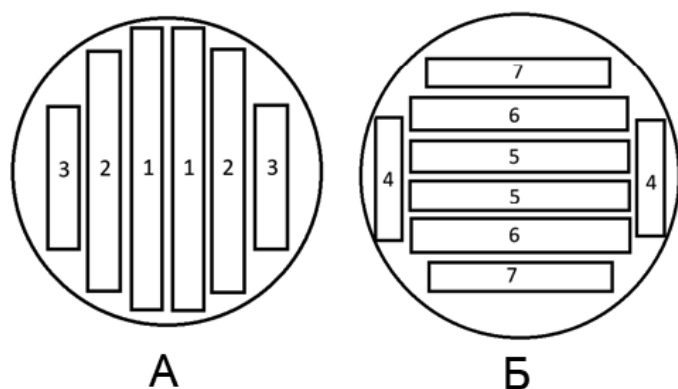


Рис. 4. Нумерация досок в поставах: А – способ раскря вразвал; Б – способ раскря с брусковкой

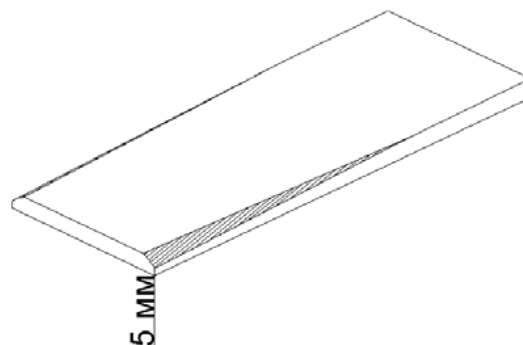


Рис. 5. Форма доски с тупым обзолом

Результаты компьютерного имитационного моделирования по определению объёмного выхода в пиломатериалах в зависимости от расположения в поставе и способа распиловки представлены на рис. 6-13.

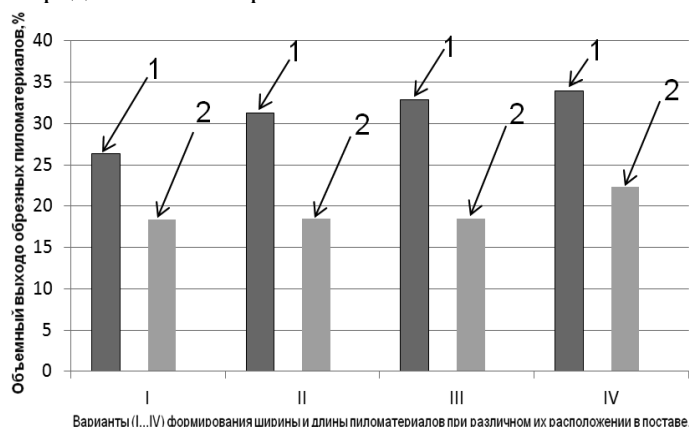


Рис. 6.Способ раскря вразвал d= 14 см. 1 – центральные доски, 2 – первая пара боковых досок

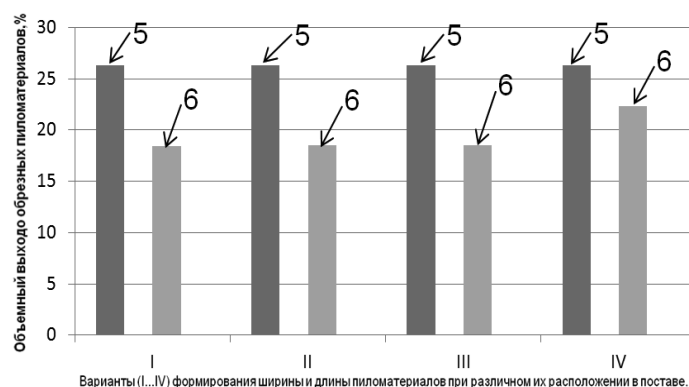
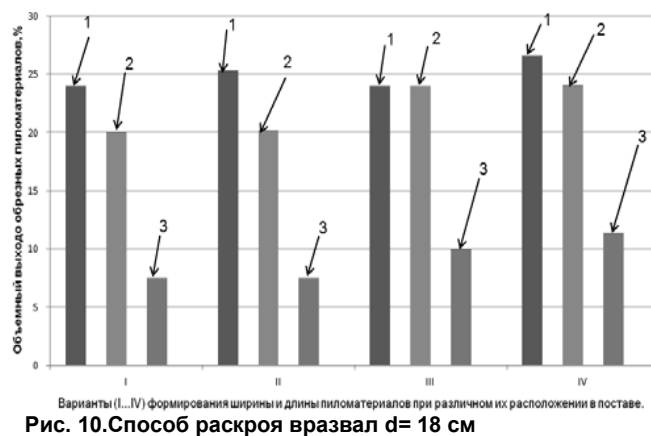
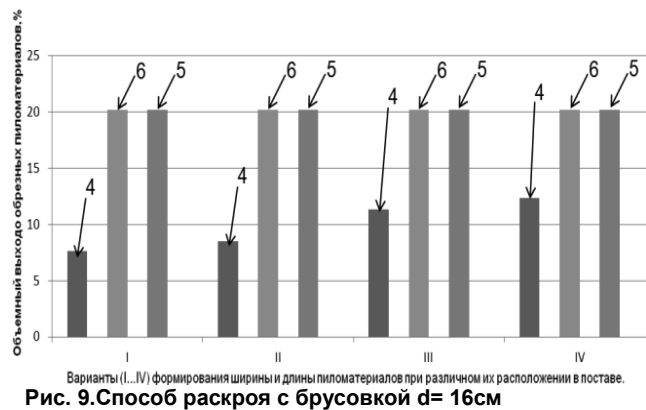
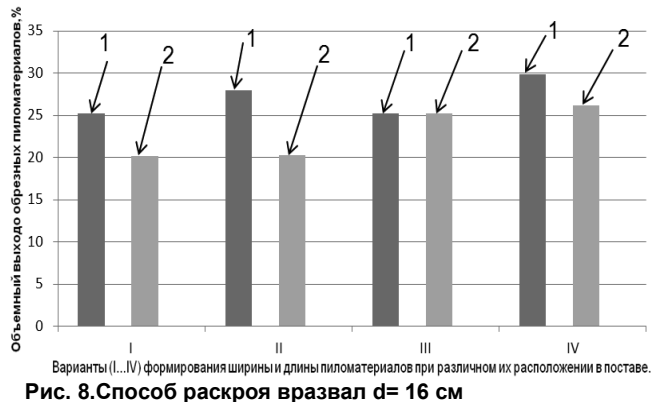
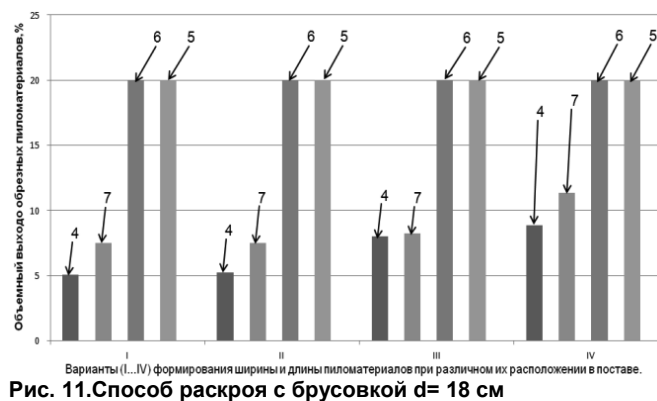


Рис. 7. Способ раскря с брусковкой d= 14 см

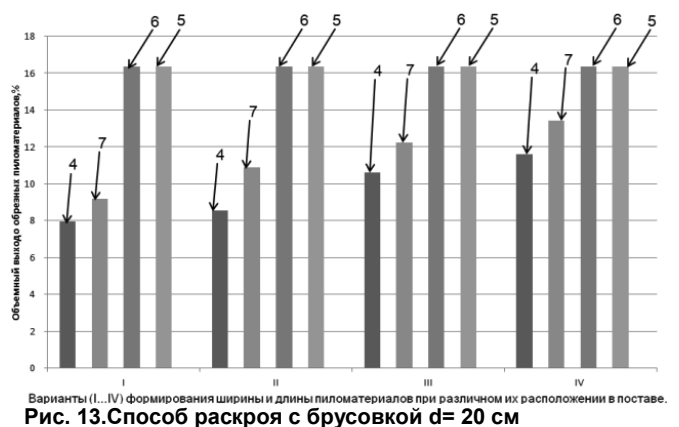
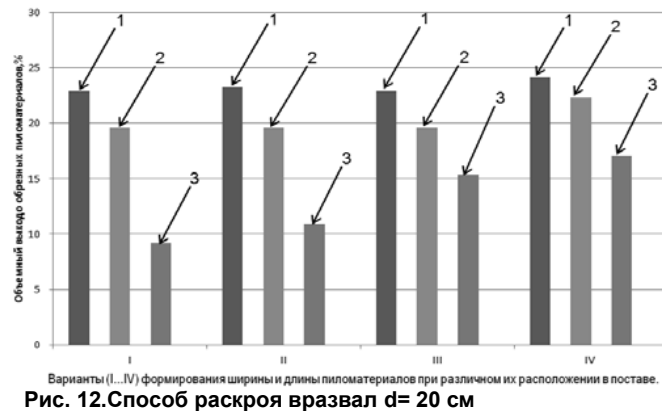
Распиловка с брусковкой, на первом проходе боковые доски отсутствуют, второй проход: 5 – центральные доски: 6 – первая пара боковых досок.



В первом проходе: 4 – первая пара боковых досок.3 – вторая пара боковых досок.



Во втором проходе: 7 – вторая пара боковых досок.



Результаты компьютерного имитационного моделирования по определению объёмного выхода обрезных пиломатериалов из березовых круглых лесоматериалов при распиловке вразвал и с брусковой представлены в табл.№.1:

I - объёмный выход обрезных пиломатериалов стандартных размеров;

II - объёмный выход обрезных пиломатериалов свободной ширины и длины;

III - объёмный выход обрезных пиломатериалов стандартных размеров с обзолом;

IV - объёмный выход обрезных пиломатериалов с обзолом свободной длины и ширинысбзолом.

Увеличение объёмного выхода по сравнению с производством пиломатериалов по действующим стандартам при распиловке вразвал представлены на рис.14, при распиловке с брусковой на рис. 15.

Таблица 1 - Сравнение объёмного выхода пиломатериалов из берёзовых круглых лесоматериалов при различных способах раскря

| №<br>п/п                                                                                             | Пиломат. по действующим<br>стандартам, % | Пиломат. свободной длины и<br>ширины, % | Пиломат. с большей<br>величиной доп. объ., % | Пиломат. свободной длины и<br>ширины с большей<br>величиной доп. объ., % | Пиломат. по действующим<br>стандартам, % | Пиломат. свободной длины и<br>ширины, % | Пиломат. с большей<br>величиной доп. объ., % | Пиломат. свободной длины и<br>ширины с большей<br>величиной доп. объ., % |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                      | I                                        | II                                      | III                                          | IV                                                                       | I                                        | II                                      | III                                          | IV                                                                       |
| Способ раскря вразвал, d =14 см                                                                      |                                          |                                         |                                              |                                                                          | Способ раскря с брусковкой, d =14 см     |                                         |                                              |                                                                          |
| 1                                                                                                    | 44,79                                    | 49,66                                   | 51,36                                        | 56,24                                                                    | 44,72                                    | 44,79                                   | 44,79                                        | 48,66                                                                    |
| Увеличение объёмного выхода по сравнению с производством пиломатериалов по действующим стандартам, % |                                          |                                         |                                              |                                                                          |                                          |                                         |                                              |                                                                          |
| 2                                                                                                    | 0,0                                      | 4,87                                    | 6,57                                         | 11,45                                                                    | 0,0                                      | 0,07                                    | 0,07                                         | 3,94                                                                     |
| Способ раскря вразвал, d =16 см                                                                      |                                          |                                         |                                              |                                                                          | Способ раскря с брусковкой, d =16 см     |                                         |                                              |                                                                          |
| 3                                                                                                    | 45,47                                    | 48,27                                   | 50,52                                        | 55,97                                                                    | 48,06                                    | 48,27                                   | 51,78                                        | 55,97                                                                    |
| Увеличение объёмного выхода по сравнению с производством пиломатериалов по действующим стандартам, % |                                          |                                         |                                              |                                                                          |                                          |                                         |                                              |                                                                          |
| 4                                                                                                    | 0,0                                      | 2,80                                    | 5,05                                         | 10,50                                                                    | 0,0                                      | 0,21                                    | 3,72                                         | 7,91                                                                     |
| Способ раскря вразвал, d = 18 см                                                                     |                                          |                                         |                                              |                                                                          | Способ раскря с брусковкой, d =18 см     |                                         |                                              |                                                                          |
| 5                                                                                                    | 51,50                                    | 53,03                                   | 58                                           | 62,05                                                                    | 52,56                                    | 52,75                                   | 56,25                                        | 60,23                                                                    |
| Увеличение объёмного выхода по сравнению с производством пиломатериалов по действующим стандартам, % |                                          |                                         |                                              |                                                                          |                                          |                                         |                                              |                                                                          |
| 6                                                                                                    | 0,0                                      | 1,53                                    | 6,50                                         | 10,55                                                                    | 0,0                                      | 0,19                                    | 3,69                                         | 7,67                                                                     |
| Способ раскря вразвал, d = 20 см                                                                     |                                          |                                         |                                              |                                                                          | Способ раскря с брусковкой, d = 20 см    |                                         |                                              |                                                                          |
| 7                                                                                                    | 51,63                                    | 53,66                                   | 57,75                                        | 63,52                                                                    | 49,79                                    | 52,05                                   | 55,51                                        | 57,66                                                                    |
| Увеличение объёмного выхода по сравнению с производством пиломатериалов по действующим стандартам, % |                                          |                                         |                                              |                                                                          |                                          |                                         |                                              |                                                                          |
| 8                                                                                                    | 0,0                                      | 2,03                                    | 6,12                                         | 11,89                                                                    | 0,0                                      | 2,26                                    | 5,72                                         | 7,87                                                                     |

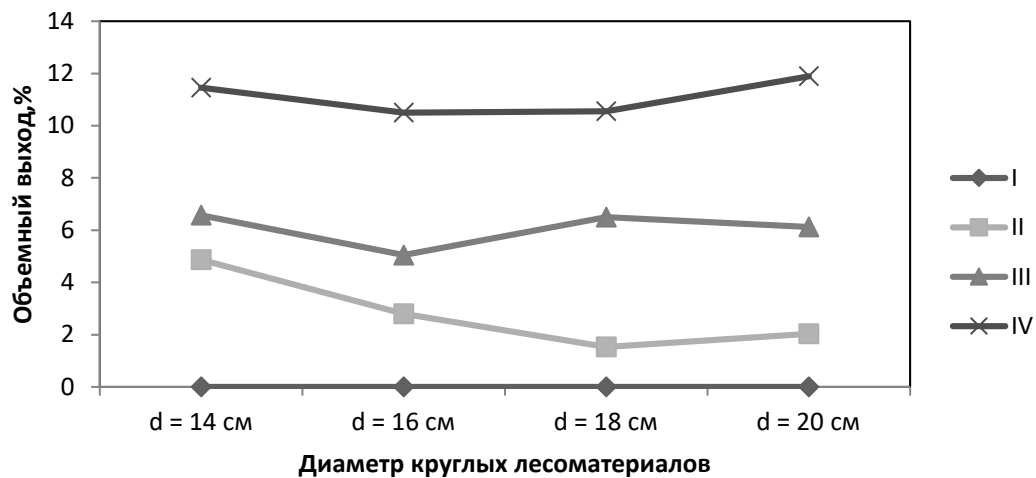


Рис. 14. Увеличение объёмного выхода по сравнению с производством пиломатериалов по действующим стандартам при распиловке вразвал

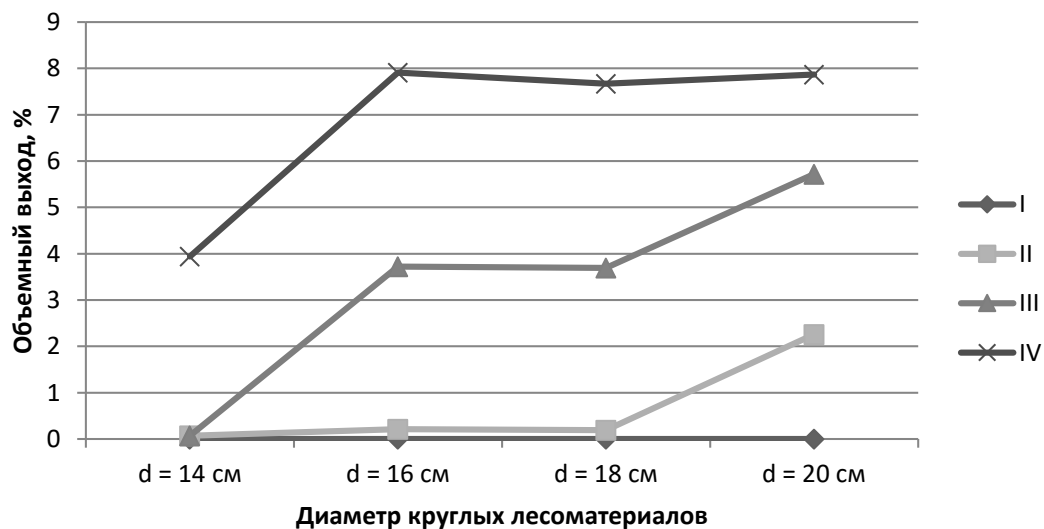


Рис. 15. Увеличение объёмного выхода по сравнению с производством пиломатериалов по действующим стандартам при распиловке с брусковкой

### Выводы

1. Гипотеза о значительном увеличении объемного выхода обрезных пиломатериалов из необрезных за счет увеличения использования сбеговой зоны путем уменьшения по толщине при обрезке пропиленной части кромки подтвердилась.

2. Увеличение объемного выхода обрезных пиломатериалов с большей величиной допускаемого обзола происходит в основном в пиломатериалах, расположенных в поставе на границе пифагорической и параболической зон, в параболической зоне.

3. Для обрезных пиломатериалов стандартных размеров с большей величиной

допускаемого обзола увеличение составило от 5,05% до 6,57% при распиловке вразвал из бревен  $d = 14 \dots 20$  см, и от 3,69% до 5,72% при распиловке с брусковкой бревен  $d = 16 \dots 20$  см.

4. Для обрезных пиломатериалов свободной ширины и длины и с большей величиной допускаемого обзола увеличение составило от 10,50% до 11,89% при распиловке вразвал и от 3,94% до 7,91% при распиловке с брусковкой бревен  $d = 14 \dots 20$  см.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 37.8809.2017/БЧ «Исследование строения, свойств и характеристик древесины как природного функционального материала для

разработки энергосберегающих и экологических технологий продукции с заданными механическими, электрическими, химическими и тепловыми характеристиками».

### Литература

1. Аксенов П.П. Теоретические основы раскроя пиловочного сырья / П.П. Аксенов // М. – Л., Гослесбумиздат, 1960. – 216 с.

2. Крылов Г. В. Методы экспериментальной оптимизации в деревообработке: учеб. пособие / В. Г. Крылов, В. Е. Пятков, М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2013. — 34 с.

3. Рыкунин С. Н. Планирование раскроя пиловочного сырья и расчет производительности поточных линий: учеб. пособие / С. Н. Рыкунин, В. Е. Пятков. — М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2011. — 80 с.

4. Кравцов, Е.В. Технологические решения переработки листовых короткомерных сортиментов / Д.В. Кондратьев, Е.В. Кравцов // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник №8 (91). – М., 2012, С. 38–41.

5. Фергин В. Р. Актуальные вопросы теории раскроя пиловочного сырья: учеб. пособие / В. Р. Фергин, О. И. Шако, О. И. Ерхова. — М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2010. — 95 с.

6. Куликова Н.В., Рыкунин С.Н.,

Кривощёков Н.В., Методика расчета поставок с заданной величиной обзола (статья), Лесотехнический журнал – научный журнал Том 6, № 3 (23). – Воронеж: 2016. – С. 91-99.

7. Рыкунин С. Н. Методы составления и расчета поставок: учеб. пособие / С.Н. Рыкунин, В. Е. Пятков. — 3-е изд., М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. — 76 с.

8. Lundahl C. G. 2007. Optimized processes in sawmills. Licentiate thesis. Luleå University of Technology, Division of Wood Technology, Skellefteå, Sweden.

9. Anders Lycken DOCTORAL THESIS Appearance Grading of Sawn Timber LTU Skellefteå Luleå University of Technology Skeria 3, S-931 87 Skellefteå, Sweden <http://www.ltu.se/ske> 2006

10. Jaakko Vuorilehto Measuring technology at mechanical wood processes Lappeenranta university of technology mechanical engineering department of wood technology

11. Lorenz Breinig DOCTORAL THESIS CT Log Scanning for Sawing Optimization with Regard to the Aesthetic Quality of Wood University of Freiburg, 2014

12. Anders Berglund DOCTORAL THESIS Efficient Utilization of Sawlogs Using Scanning Techniques and Computer Modelling, Luleå University of Technology Skellefteå, Sweden.

© А.А. Каптелкин - магистрант «МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана», Н.В.Куликова - ст. преподаватель «МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана», С.Н. Рыкунин - , д.т.н., профессор «МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана»

УДК 674.816

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЦЕМЕНТНО-СТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ ГИПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ

А.А. Калимуллин, Ф.В. Назипова, Р.Р. Богданов

*В работе рассмотрены вопросы повышения эксплуатационных характеристик цементно-стружечных плит путем введения добавок гиперпластификаторов. Изучено влияние гиперпластификаторов на нормальную плотность и сроки схватывания. Также определено влияние исследуемых добавок на тепловыделение и контракцию цементного теста. Проведенные исследования свидетельствуют о высокой эффективности добавок на основе эфиров поликарбоксилата и полиарила.*

**Ключевые слова:** цементно-стружечные плиты, модификация, добавки, суперпластификатор, цементное тесто, гидратация, композиционный материал.

*The paper considers the issues of increasing the operational characteristics of cement-chipboards by introducing additives of hyperplasticizers. The influence of hyperplasticizers on normal density and setting time was studied. The effect of the test additives on the heat release and cement test contraction was also*

*determined. The carried out researches testify to high efficiency of additives on the basis of ethers of polycarboxylate and polyaryl.*

**Keywords:** *cement-particle boards, modification, additives, superplasticizer, cement dough, hydration, composite material.*

## Введение

Древесина и древесные композиционные материалы издавна широко используются человеком в различных сферах. Исходя из растущего потребления древесины и, зачастую, нерационального её использования, остро стоит вопрос переработки низкосортной древесины и отходов деревообработки. Производство цементно-стружечных плит (ЦСП) позволяет не только получать конкурентоспособный конструкционный материал с рядом желаемых свойств, но и комплексно использовать древесину и утилизировать древесные отходы.

Применение плит в строительстве, а также при внешней и внутренней отделке, получило широкое распространение.

В состав ЦСП плиты входит мелкая древесная стружка, портландцемент, вода и специальные добавки, которые препятствуют негативному воздействию дерева на цемент. Данный материал изготавливается в заводских условиях при соблюдении достаточно серьезных требований, чтобы конечный продукт соответствовал ГОСТ 26816-86.

Модификация ЦСП с целью увеличения прочности и плотности возможна за счет введения гиперпластификаторов.

Известно, что бетон – это наиболее часто используемый материал в строительстве. Применение бетона в современном строительстве не знает границ. В соответствии с целями и условиями строительства, многие характеристики бетона можно изменить при помощи введения различных добавок. Выделяют несколько наиболее используемых модификаторов пластифицирующего действия: регуляторы твердения и схватывания цементного теста, а также комплексные добавки полифункционального действия.

Первые отечественные суперпластификаторы были разработаны в начале 40-х гг. XX в., благодаря которым был достигнут наиболее высокий пластифицирующий эффект. Одним из самых распространенных на тот период времени суперпластификаторов считался С-3, изготовленный на основе продуктов конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида. Благодаря данному

суперпластификатору получилось существенно повысить сульфатостойкость бетона.

Спустя несколько лет в середине XX в. появились бетоны с более высокими техническими характеристиками, которые носят название High Performance Concrete (HPC). Этот модифицированный бетон со сверхвысокой прочностью, повышенной коррозионной стойкостью и пониженной экзотермией, считался самым долговечным в использовании.

С помощью бетонов HPC появилась возможность возводить каркасы зданий высотой до 400 м. Одними из наиболее наглядных примеров являются объекты на ММДЦ «Москва-Сити», где с применением высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей возведены массивные фундаментные плиты из бетонов классов В40-В50 [1].

Уже в конце XX в. были представлены существенные разработки в сфере технологии получения бетонов с повышенной прочностью в сочетании с другими высокими показателями бетона и бетонных смесей путем использования суперпластификаторов и органоминеральных модификаторов. Наиболее широкое распространение среди бетонов в настоящее время получили суперпластификаторы серии СП-1, Реламикс, Лигнопан, а также модификаторы МБ10-01, МБ10-30С, МБ10-50С, МБ-10-100С и др. Бетоны классов В-50-В100 стали использовать в строительстве по прочности при сжатии. Повышение прочности бетона было реализовано за счет снижения потребляемой арматуры и расхода бетона [2-3].

Вначале XXI в. большое развитие в строительстве получило монолитное домостроение с применением различных добавок, но большое количество видов суперпластификаторов (СП) и гиперпластификаторов (ГП) затрудняло работу практиков, так как оценка эффективности не охватывала всех параметров.

Поэтому учеными был разработан способ, который позволял оценить эффективность любых добавок СП и ГП во взаимодействии с определенным цементом по широкому спектру характеристик [4-6].

В последнее время начали выпускаться множество различных химических добавок, например:

- Суперпластификатор на основе резорцинформальдегидных олигомеров – с помощью данного модификатора были получены мелкозернистые вибропрессованные бетоны повышенной прочности и морозостойкости. Этот вид бетонов очень актуален в наше время и применяется при создании тротуарной плитки, элементов мощения. За счет многообразия конфигураций и богатой цветовой гамме, тротуарные плитки становятся очень популярными, так как данный бетон имеет высокую морозостойкость и износостойкость, вдобавок ко всему многолетний срок службы обеспечивается благодаря введению суперпластификатора [7].

- Модификатор Полипласт СП-1 – добавка на основе полимерных сульфокислот нафталина, изготавливается, как в сухом, так и в жидком виде. На сегодня данный вид суперпластификатора занимает первое место как по качеству, так и по объемам применения. Полипласт СП-1 позволяет получить высокоподвижные смеси без потери прочности бетона при сжатии. Использование модификатора Полипласт СП-1 снижает дополнительное воздухововлечение в бетонные смеси до 1%, что помогает повысить прочность бетона, устранить крупные поры и улучшить качество его поверхности. Цифра в названии означает время сохраняемости бетонной смеси в минутах, а буквы П и СП – пластификатор и суперпластификатор соответственно. Чаще всего данный вид модификатора используют в теплое время года, для наиболее длительного времени сохраняемости бетонной смеси, например при перевозке на большие расстояния.

- Модификатор Реламикс – добавка на основе тиосульфата и роданида натрия, с добавлением Полипласта СП-1, также выпускается в двух видах: сухом и жидком. Данный суперпластификатор используют для повышения прочности бетона. При испытании было выявлено, что при использовании сухого вида продукта Реламикса сроки твердения выше, чем при использовании с жидким видом.

- Модификатор Полипласт СП-3. Эта добавка по своим техническим характеристикам аналогична базовому продукту – суперпластификатору Полипласт СП-1, но

имеет более низкую цену. Также не менее важным преимуществом этой добавки перед модификатором Полипласт СП-1 является повышение сохраняемости бетонной смеси до 1,5 ч, в то время, как полипласт СП-1 способен обеспечивать данный показатель лишь менее 60 мин.

В последние годы все чаще стали применять гиперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилата. Было обнаружено, что при их добавлении существенно увеличивается ранняя прочность бетона, снижается потребляемость воды и цемента даже при небольшом количестве добавления гиперпластификатора.

В патенте на изобретение к производству строительных материалов, а в частности цементно-стружечных плит [17] авторами рассмотрен способ модификации цементно-стружечной плиты при помощи суперпластификатора СП-1, а также с добавлением поливинилацетата и сульфата алюминия. С применением суперпластификатора СП-1 повышается технологичность цементно-стружечной смеси (перемешивание, удобоукладываемость), увеличиваются прочностные характеристики цементно-стружечной плиты, что ведет к снижению расхода портландцемента.

Поливинилацетат в сырьевой смеси способствует снижению водопоглощения и разбухания по толщине при замачивании, повышению морозостойкости и, как следствие, улучшению эксплуатационных характеристик.

Добавление сульфата алюминия позволяет нейтрализовать сахара, содержащийся в древесном сырье [15,16].

Кроме этого, использование суперпластификаторов и гиперпластификаторов значительно удешевляет процесс производства цементных композиций за счет экономии цемента и трудозатрат.

Выбор пластифицирующих добавок в технологии бетонов основывается на их эффективности в зависимости от вида заполнителей цементных композиций и цемента [8, 9, 13]. При использовании современных суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов и эфиров полиарилата заметно снижается водоцементное отношение, что приводит к увеличению прочностных характеристик [10-12, 14]. При этом

гиперпластификатор на основе полиарила менее чувствителен к виду цемента. Добавка Master Polyheed 3040 на основе эфира полиарила снижает водоцементное соотношение и вязкость бетонной смеси на 25-30%, тем самым дополнительно уменьшает производственные затраты за счёт низкой цены состава смеси и процесса ее укладки и уплотнения. Одновременно Master Polyheed 3045 обеспечивает ранний набор прочности бетона, а значит, позволяет существенно сократить сроки тепловлажностной обработки изделий, увеличить оборачиваемость форм и, таким образом, повысить производительность процесса.

Компания BASF разработала новую систему Zero Energy System (Система нулевой энергии), которая оптимизирует энергетические затраты, необходимые для изготовления бетонных изделий, за счет ускорения процесса гидратации без дополнительного подогрева. Главным компонентом Zero Energy System является гиперпластификатор Master Glenium® ACE. Это самое последнее поколение добавок на основе эфиров поликарбоксилата. Master Glenium® ACE быстро адсорбируются на поверхности частиц цемента и способствуют быстрому диспергированию последних за счет сил электростатического и стерического отталкивания. Уникальная молекулярная структура Master Glenium® ACE способствует увеличению поверхности контакта частиц цемента с водой, максимально полно используя потенциал гидратации цемента. Благодаря данному суперпластификатору получилось добиться наиболее раннего увеличения прочности изделия.

Целью работы является изучение влияния современных суперпластифицирующих добавок на физико-технические свойства древесно-цементного теста. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- исследовать влияние суперпластификаторов на нормальную густоту и сроки схватывания древесно-цементного теста;
- исследовать влияние модификаторов на процессы гидратации цемента методами термостной калориметрии и определением контракции древесно-цементного теста.

## Методы и материалы

В качестве вяжущего использовали портландцемент ЦЕМ II/A-K (Ш-П) 32,5Б ГОСТ 31108-2016 производства ООО «Холсим (Рус)» (ОАО «Вольскцемент»). В состав цемента входят основные минералы:  $C_3S$  – 68 %,  $C_2S$  – 10 %,  $C_3A$  – 3,7 %,  $C_4AF$  – 15 % и добавки: опока – 6 %,  $SO_3$  – 2,2 %.

В качестве древесного наполнителя за основу была взята щепа сосны средней фракции (5-10 мм).

В качестве модификаторов в исследованиях использованы следующие добавки:

- Master Glenium® ACE 430 представляет собой водный раствор поликарбоксилатного эфира, жидкость светло-коричневого цвета. Рекомендуемая дозировка 0,2 – 1% от веса цемента, производитель ООО «БАСФ Строительные системы»;

- Glenium® Master Polyheed® 3040 представляет собой однородную жидкость желтого цвета, на основе эфиров полиарила. Рекомендуемая дозировка 0,3-2,0% от массы цемента, производитель ООО «БАСФ Строительные системы»;

- PC2016 представляет собой порошковый продукт, полученный методом распылительной сушки на основе модифицированного полиэфиркарбоксилата, рекомендуемая дозировка 0,16-0,5 % от массы цемента, производитель ООО «Новые технологии».

Добавки в дальнейшем будут обозначены ACE 430, MP 3040, PC 2016 соответственно.

Определение нормальной густоты и сроков схватывания древесно-цементного теста проводилось по стандартной методике на приборе Вика в соответствии с ГОСТ 310.3-81.

Исследование кинетики тепловыделения древесно-цементного теста проводилось термосным методом с использованием измерительного комплекса “Термохрон DS1921”.

Исследования контракции древесно-цементного теста проводилось по методикам измерения МИ 2486-98 и МИ 2487-98 на контракциометрическом тестере активности цемента «Цемент-прогноз».

## Результаты исследований

Проведены экспериментальные исследования влияния гиперпластификаторов на изменение нормальной густоты и сроков

схватывания древесно-цементного теста. Результаты приведены в таблице 1.

Из полученных данных (таблица 1) видно, что при введении добавки АСЕ 430 наиболее интенсивное снижение водопотребности древесно-цементного теста (на 26-30 %) наблюдается при содержании этой добавки в количестве 1-1,5% от массы цемента. Начало схватывания с добавкой АСЕ 430 увеличивается на 80-180 мин, конец схватывания увеличивается на 190-330 мин по сравнению с контрольным составом.

**Таблица 1 - Влияние пластифицирующих добавок на изменение нормальной густоты (Н.Г.) и сроков схватывания древесно-цементного теста**

| № п/п | Наименование добавок | Содержание добавок, % | Н.Г., % | Сроки схватывания, мин |       |
|-------|----------------------|-----------------------|---------|------------------------|-------|
|       |                      |                       |         | Н.С.*                  | К.С.* |
| 1     | —                    | —                     | 29,00   | 150                    | 270   |
| 2     | АСЕ 430              | 0,5                   | 23,12   | 160                    | 350   |
| 3     |                      | 1,0                   | 21,33   | 230                    | 460   |
| 4     |                      | 1,5                   | 20,30   | 330                    | 600   |
| 5     | МР 3040              | 0,5                   | 23,25   | 160                    | 340   |
| 6     |                      | 1,0                   | 21,50   | 200                    | 480   |
| 7     |                      | 1,5                   | 20,50   | 300                    | 580   |
| 8     | РС 2016              | 0,16                  | 24,70   | 220                    | 370   |
| 9     |                      | 0,2                   | 24,25   | 240                    | 410   |
| 10    |                      | 0,3                   | 23,55   | 260                    | 500   |
| 11    |                      | 0,4                   | 23,25   | 270                    | 600   |
| 12    |                      | 0,5                   | 23,00   | 280                    | 680   |

Примечание\*: Н.С. и К.С. — начало и конец схватывания соответственно.

Оптимальным содержанием добавки МР 3040, как это следует из табл. 1, является ее содержание 1-1,5% от массы цемента. При таком содержании добавки наблюдается снижение водопотребности древесно-цементного теста на 26-29%. Сроки схватывания при введении добавки МР 3040 увеличиваются начало и конец схватывания: начало схватывания на 50-150 мин, конец схватывания – на 210-310 мин по сравнению с контрольным составом.

При введении добавки РС 2016 наиболее интенсивное снижение водопотребности древесно-цементного теста наблюдается при содержании этой добавки в количестве 0,3-0,5% от массы цемента и составляет 19-21%. Сроки схватывания при введении добавки РС 2016 увеличиваются, начало схватывания на 110-130 мин, конец схватывания на 230-410 мин.

Изменение нормальной густоты цементного теста от содержания добавок описывается уравнениями, представленными в таблице 2.

**Таблица 2 - Уравнения аппроксимации, описывающие изменение нормальной густоты (%) и сроков схватывания (мин) от содержания добавок (в % от массы цемента)**

| № п/п | Наименование добавок | Уравнения аппроксимации                                                                                                  |
|-------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | АСЕ 430              | $\text{Н.Г.} = 4,85x^2 - 12,85x + 29$ $\text{Н.С.} = 90x^2 - 13x + 150$ $\text{К.С.} = 60x^2 + 130x + 270$               |
| 2     | МР 3040              | $\text{Н.Г.} = 4,75x^2 - 12,575x + 29$ $\text{Н.С.} = 90x^2 - 37x + 150$ $\text{К.С.} = 30x^2 + 169x + 270$              |
| 3     | РС 2016              | $\text{Н.Г.} = 36,49x^2 - 29,406x + 29$ $\text{Н.С.} = 312,5x^2 + 387,5x + 150$ $\text{К.С.} = 370,8x^2 + 658,42x + 270$ |

Таким образом, выполненные исследования показали, что по интенсивности снижения водопотребности древесно-цементного теста исследуемые пластифицирующие добавки располагаются в следующей убывающей последовательности: АСЕ 430, МР 3040, РС2016. Для всех исследуемых модификаторов характерно значительное увеличение сроков схватывания теста.

Проведены экспериментальные исследования кинетики тепловыделения при гидратации цемента и контракции цементного теста в присутствии пластифицирующих добавок. На рис. 1 приведены температурные кривые гидратации портландцемента с исследуемыми модификаторами.

Из данных рис. 1 видно, что все добавки-гиперпластификаторы замедляют гидратацию портландцемента. Длительность индукционного периода в присутствии добавок дольше на 3-5

часов по сравнению с составом без добавок. Достижение максимума температуры с добавками наступает на 6-8 часов позднее контрольного состава. Наибольшая величина температурного максимума наблюдается в присутствии добавки АСЕ 430 и составляет 67,5 °С, что на 7 °С выше по сравнению с контрольным составом, это свидетельствует о увеличении степени гидратации вяжущего. При введении добавок МР3040 и РС2016 максимум температурного пика также выше на 5-6,5°С по сравнению с составом без добавок.

На рис. 2 приведены данные по измерению контракции цементного теста на контракциометрическом тестере активности цемента «Цемент-прогноз».

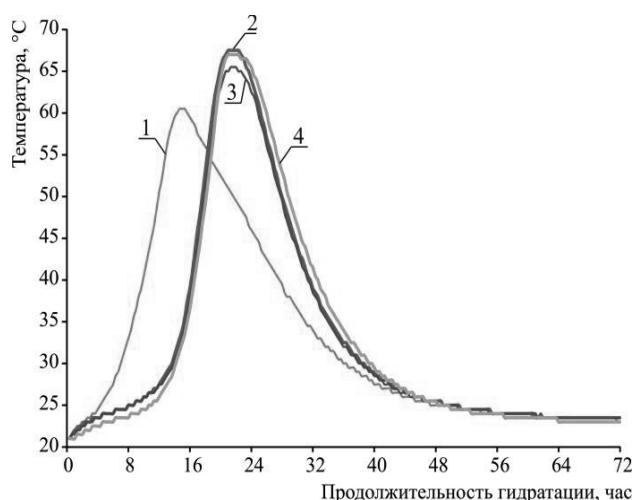


Рис. 1. Тепловыделение при гидратации портландцемента с добавлением пластифицирующих добавок: 1 – без добавок; 2 – АСЕ 430 (1 %); 3 – МР 3040 (1 %); 4 – РС 2016 (0,3 %)

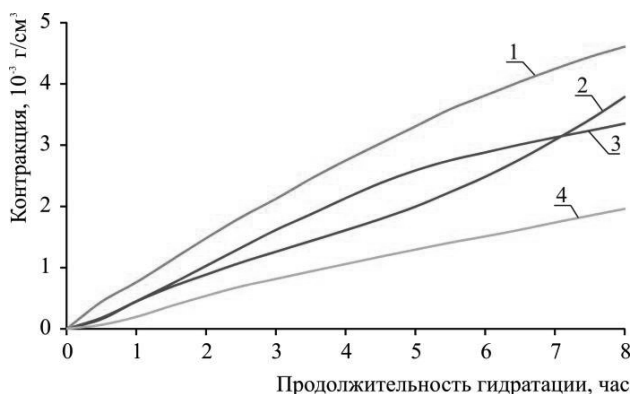


Рис. 2. Контракция цементного теста на портландцементе с добавлением пластифицирующих добавок: 1 – без добавок; 2 – АСЕ 430 (1 %); 3 – МР 3040 (1 %); 4 – РС 2016 (0,3 %)

По данным, представленным на рис. 2, видно, что введение добавки АСЕ 430 приводит к увеличению величины контракции на  $0,355 \cdot 10^3$  г/см<sup>3</sup> в первые 3 часа гидратации цементного теста, что свидетельствует об ускорении процесса гидратации данного вида цемента при естественном твердении.

В дальнейшем величина контракции цементного теста с добавкой АСЕ 430 ниже на  $0,439 \cdot 10^3$  г/см<sup>3</sup> в первые 8 часов гидратации, чем в составе без добавок. Величина контракции цементного теста с добавкой РС2016 в первые 3 часа гидратации цементного теста ниже на  $0,445 \cdot 10^3$  г/см<sup>3</sup>, чем в составе без добавки, а в дальнейшем ниже (на  $1,83 \cdot 10^3$  г/см<sup>3</sup> в первые 8 часов гидратации), чем в составе без добавок. Среди исследуемых добавок выделяется добавка МР 3040, которая увеличивает величину контракции как в первые 3 часа (на  $0,863 \cdot 10^3$  г/см<sup>3</sup>), так и через 8 часов гидратации (на  $0,817 \cdot 10^3$  г/см<sup>3</sup>). Так величина контракции при гидратации цементного теста с добавкой МР 3040 в первые 8 часов гидратации выше в 1,38-2,35 раза по сравнению с добавками АСЕ 430 и РС2016 соответственно.

Зависимости величины контракции цементного теста от времени (в исследуемом интервале до 8 часов) описываются полиномами второй степени, представленными в таблице 3, с достоверностью аппроксимации 0,99.

В результате проведенных исследований предложена следующая рецептура ЦСП, представленная в таблице 4.

Таблица 3 - Уравнения аппроксимации, описывающие изменения контракции цементного теста от времени

| Наименование добавок | Уравнения аппроксимации, $10^{-3}$ г/см <sup>3</sup> |
|----------------------|------------------------------------------------------|
| Контрольный          | $0,0164x^2 + 0,3147x + 0,0928$                       |
| АСЕ 430              | $-0,0306x^2 + 0,6847x - 0,1448$                      |
| МР 3040              | $-0,0271x^2 + 0,7945x + 0,0061$                      |
| РС 2016              | $-0,0066x^2 + 0,3018x - 0,0486$                      |

Таблица 4 - Рецептура изготовления ЦСП

| Компоненты                                                                  | Соотношение компонентов, мас. %: |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Портландцемент                                                              | 40-45                            |
| Щепа сосны                                                                  | 30-40                            |
| Суперпластификатор на поликарбоксилатэфирном основании                      | 0,2-0,4                          |
| Гидрофобизирующая кремнийорганическая жидкость на основе силиконатов натрия | 0,02-0,06                        |
| Вода                                                                        | 19-25                            |

### Выводы

Исследование влияния гиперпластификаторов на основе эфира поликарбоксилата и полиарила на нормальную густоту и сроки схватывания показали, что наибольший водоредуцирующий эффект достигается при введении добавок АСЕ 430 и МР 3040 в дозировке 1-1,5 % от массы цемента, при этом сроки схватывания цементного теста с данными модификаторами увеличиваются в меньшей степени по сравнению с добавкой РС2016.

Результаты исследования гидратации цементного теста показывают, что величина температурного максимума в составах с исследуемыми добавками выше по сравнению с контрольным составом. При этом введение добавки МР 3040 на основе эфира полиарила приводит также к увеличению контракции цементного теста.

Установлено, что для повышения эксплуатационных характеристик ЦСП наиболее эффективным гиперпластификатором является АСЕ 430 в дозировке 1-1,5 % от массы цемента, а в случае если при производстве ЦСП используется цемент разных производителей, то предпочтительнее использование добавки МР 3040.

### Литература

1. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В.. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ

«Москва-Сити». Строительные материалы. 10-2006. С 13-17.

2. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ.2002. 500 с.

3. Бабков В.В., Сахибгареев Р.Р., Колесник Г.С., Кабанец В.В., Терехов И.Г., Салов А.С., Каранаева Р.З., Саватеев Е.Б.. Радиационные области применения модифицированных бетонов в современном строительстве. Строительные материалы. 10-2006. С 20-22.

4. Калашников В.И., Демьянова В.С., Борисов А.А. Классификационная оценка цемента в присутствии суперпластификаторов для высокопрочных бетонов //Известия вузов. Строительство. 1999. № 1. С. 39–42.

5. Демьянова В.С., Калашников В.И., Ильина И.Е., Кудашов В.Я.. Быстротвердеющие цементные композиции повышенной гидрофобности // Современное состояние и перспектива развития строительного материаловедения. Материалы VIII академических чтений РААСН. Самара. 2004. С. 152–155.

6. Несветаев Г.В., Налимова А.В.. Оценка суперпластификаторов применительно к отечественным цементам // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии. Материалы Второй международной науч. конф. Ростов-на-Дону: РГСУ. 2002. С. 269–274.

7. Косухин М.М., Шапалов Н.А., Денисова Ю.В., Попова А.В., Лещев С.И., Шухова В.Г., Комарова Н.Д.. Вибропресованные бетоны с суперпластификатором на основе резорцинформальдегидных олигомеров. Строительные материалы. 10-2006. С 32-33.

8. Якупов М.И., Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г. модифицированный мелкозернистый бетон для возведения монолитных покрытий взлетно-посадочных полос аэродромов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4 (26). С. 257-261.

9. Степанов С.В., Морозов Н.М., Хозин В.Г. Исследование фазового состава гидратированного цемента комплексным ускорителем твердения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 1. С. 142-147.

10. Красникова Н.М., Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г. Опыт внедрения мелкозернистых бетонов при производстве

дорожных плит // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 7 (51). С. 46-54.

11. Бухаркин В.И. Об основных свойствах цементно-стружечных плит / В.И. Бухаркин, Л.В. Гольцева // Научные труды МЛТИ. – М. : МЛТИ, 1982. – Вып. 143. – С. 109-112.

12. Химическая агрессивность заполнителя растительного происхождения по отношению к цементу. Полищук А.И., Рубинская А.В. (ЛфСибГТУ, г. Лесосибирск, РФ).

13. Изотов В.С., Соколова Ю.А.. Химические добавки для модификации бетона. – М.: Казанский Государственный архитектурно-строительный университет: Издательство «Палеотип», 2006. – с. 244.

14. Изотов В.С., Ибрагимов Р.А., Богданов Р.Р. Исследование влияния супер- и

гиперпластификаторов на основные свойства цементного теста // Известия КазГАСУ. 2013. №2(24). С. 221–225.

15. Сафин Р.Р., Назипова Ф.В., Воронин А.Е., Зиятдинов Р.Р. Ультразвуковая экстракция водорастворимых сахаров из древесины в производстве композиционных материалов. Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т 18, №16. С. 188-190.

16. Назипова Ф.В., Мухаметзянов Ш.Р., Деревообрабатывающая промышленность, 3, 49-51 (2014).

17. Патент на изобретение №2376254. Фирсов А.В., Постой Л.В.

© Калимуллин А.А. – магистрант кафедры «Архитектуры и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [fluwow@yandex.ru](mailto:fluwow@yandex.ru); Назипова Ф.В. – ассистент кафедры «Архитектуры и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технологический университет", [faridan13@mail.ru](mailto:faridan13@mail.ru); Богданов Р.Р. – ассистент кафедры «Технологии строительного производства» «КГАСУ», [bogdanov.r.r@yandex.ru](mailto:bogdanov.r.r@yandex.ru).

УДК 674.812.2:539.3

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ

С.А. Одинцева, С.Н. Исаков, И.В. Яцун

*В работе предложен способ моделирования по определению жесткостно-прочностных показателей слоистого материала специального назначения.*

**Ключевые слова:** композиционный слоистый материал, защита от рентгеновского излучения, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

*A method for modeling the determination of the stiffness-strength parameters of a special-purpose laminate is proposed.*

**Key words:** composite laminate, protection from X-ray radiation, stress-strain state, finite element method.

### Введение

Настоящее время называют веком «композиционных материалов». Действительно, сейчас доля композиционных материалов среди потребительских материалов как никогда велика и с каждым годом растет. Главное их преимущество по сравнению с традиционными материалами – уникальное сочетание свойств. Как правило, они не являются «чемпионами» по

отдельно взятому свойству, но по сочетанию определенных свойств им нет равных [1].

Композиционный материал (композит) представляет собой неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, среди которых можно выделить армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала, и матрицу (или связующее),

обеспечивающую совместную работу армирующих элементов [2,3].

К композиционным относятся материалы, обладающие следующей совокупностью признаков [4]:

- не встречаются в природе, поскольку созданы человеком;
- состоят из двух или более компонентов, различающихся по своему химическому составу и разделенных выраженной границей;
- имеют новые свойства, отличающиеся от свойств составляющих их компонентов;
- неоднородны в микромасштабе и однородны в макромасштабе;
- состав, форма и распределение компонентов «запроектированы» заранее;
- свойства определяются каждым из компонентов, которые в связи с этим должны быть в материале в достаточно больших количествах больше некоторого критического содержания).

Все композиционные материалы можно разделить на два вида: естественные и искусственные. Одним из самых распространенных на Земле естественных композиционных материалов является древесина. Это легкий и в то же время прочный материал, хорошо поддающийся механической обработке, облагораживанию и склеиванию, отличается гигиеничностью и неповторимой красотой [5]. Известно, что физико-механические показатели натуральной древесины различны в разных направлениях. Она гигроскопична, подвержена разбуханию и усушке, разрушению грибами и бактериями, а ее качества сильно зависят от породы дерева, условий произрастания, заготовки и ряда других факторов. Технология производства композитов на основе древесины позволяет получать материалы, у которых эти недостатки либо отсутствуют, либо проявляются в меньшей степени [6].

По виду наполнителя выделяют три группы древесных композиционных материалов [7]:

- изготовленные на основе цельной (массивной) древесины с предварительной ее пропиткой модификатором – модифицированная древесина;
- приготовленные с использованием в качестве наполнителя тонких листов (древесного шпона толщиной 0,55-1,5 мм) и в качестве связующего синтетических смол;

после высокотемпературного прессования получают древесно-слоистый пластик;

- наполненные дискретными частицами – древесным волокном, стружкой, дробленкой, опилками, корой и др. (древесностружечные, древесноволокнистые плиты, древесные прессовочные массы, различные древесно-минеральные материалы).

В зависимости от природы матрицы можно выделить три группы древесных композитов [7]:

- материалы, получаемые с использованием синтетических полимеров (древесностружечные и древесноволокнистые плиты, древеснослоистые и бумажнослоистые пластики, разнообразные древесные прессмассы);
- материалы, изготавливаемые с применением неорганических вяжущих веществ (клинкерный цемент, гипс, магнезиальные вяжущие вещества; их используют для производства таких материалов, как арболит, цементно-стружечные плиты, опилкобетон, фибролит и многие другие);

- материалы, получаемые с применением природных клеящих веществ. Клеящие вещества в этом случае образуются при воздействии на древесину воды при высокой температуре; продукты термо-гидролитического расщепления компонентов древесины, главным образом, легкогидролизуемых углеводов и лигнина, выполняют роль связующих веществ при изготовлении древесноволокнистых плит мокрого способа производства и пьезотермопластиков.

Композиционные материалы со слоистой структурой состоят из чередующихся слоев фольги или листов материалов различной природы или состава [2]. Одним из таких материалов является фанера, представляющая собой слоистый материал, состоящий из склеенных между собой листов лущеного шпона, нередко в композиции с другими материалами. В листе фанеры различают наружные (лицевой и оборотный) и внутренние слои шпона, отличающиеся качеством и иногда породой древесины [8].

В основу классификации фанеры положен ряд конструктивных и технологических признаков, определяющих эксплуатационные качества каждого ее вида [8]:

- обычная фанера – общего назначения, строительная, авиационная, фанера для внутреннего потребления и для экспорта;

- бакелизованная фанера;

- облицованная фанера – строганным шпоном, бумагой, бумажным слоистым пластиком, металлами, материалами на основе стеклоткани, материалами на основе асбеста, тканями, пробковой крошкой;

- отделанная фанера – синтетическими пленками, прозрачной бумагой, пропитанной клеями, жидкими прозрачными материалами, жидкими укывистыми материалами, механическим способом;

- профилированная фанера.

Многообразие композиционных материалов на основе древесины в разных формах находят широкое применение в различных областях народного хозяйства. Это свидетельствует об актуальности их применения и разработки.

В представленной работе рассматриваются композиционный слоистый материал специального назначения типа «ФАНОТРЕН Б», фанера с защитой от рентгеновского излучения.

Защитный материал планируется использовать в строительстве и отделке помещений с повышенным радиационным фоном (воздействием), элементах мебели и защитных экранах, ширм и тому подобное. Для расширения сфер использования слоистых материалов специального назначения требуется знать жесткостно-прочностные характеристики материала. Поскольку лист фанеры – конструкция многослойная, представляет интерес определить закономерности распределения статической нагрузки между отдельными слоями шпона.

### Методы и материалы

В конструкции композиционного материала использованы слои связующего и слои лущеного шпона, что также усиливает прочностные свойства предлагаемого композиционного материала.

В конструкции композиционного материала использованы армирующие слои, которые выполняют роль рентгенозащиты и слои лущеного шпона для придания эстетичности и универсальности материалу, а также для усиления прочностных свойств предлагаемого композиционного материала.

С целью определения жесткостно-прочностных показателей слоистого материала в программе Компас 3Д была создана твердотельная модель трехслойной фанеры, которая представлена на рис.1. Образец имеет форму параллелепипеда размерами 45мм × 45мм × 9,5мм. Модель состоит из слоев А и Б – березового лущеного шпона, причем слои располагаются так, что направления волокон перпендикулярны предыдущему слою, толщина слоев 1,5 мм. Слои В толщиной 3 мм - это рентгенозащитный слой (РЗС). Для нагружения образца смоделирован металлический пуансон Г. Механические свойства материалов представлены в табл. 1 [9, 10].

Моделирование напряженно-деформированного состояния производилось в программе инженерных расчетов, основанной на методе конечных элементов. Для этого в программе строилась конечно-элементная сетка, которая представлена на рис. 2.

**Таблица 1 - Характеристики материалов в модели**

| Физический параметр          | Материал слоя А (древ.поперек) | Материал слоя Б (древ.вдоль) | Материал слоя В (РЗС) | Материал пуансона Г |
|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Модуль Юнга по X, ГПа        | 12,1                           | 0,605                        | 1,54                  | 210                 |
| Модуль Юнга по Y, ГПа        | 0,605                          | 12,1                         |                       |                     |
| Модуль Юнга по Z, ГПа        | 0,9438                         | 0,9438                       |                       |                     |
| Коэффициент Пуансона по X    | 0,697                          | 0,426                        | 0,1                   | 0,3                 |
| Коэффициент Пуансона по Y    | 0,426                          | 0,697                        |                       |                     |
| Коэффициент Пуансона по Z    | 0,451                          | 0,451                        |                       |                     |
| Модуль сдвига по X, ГПа      | 3,56                           | 0,21                         | 0,7                   | 80,5                |
| Модуль сдвига по Y, ГПа      | 0,21                           | 3,56                         |                       |                     |
| Модуль сдвига по Z, ГПа      | 0,32                           | 0,32                         |                       |                     |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup> | 620                            | 620                          | 1800                  | 7850                |

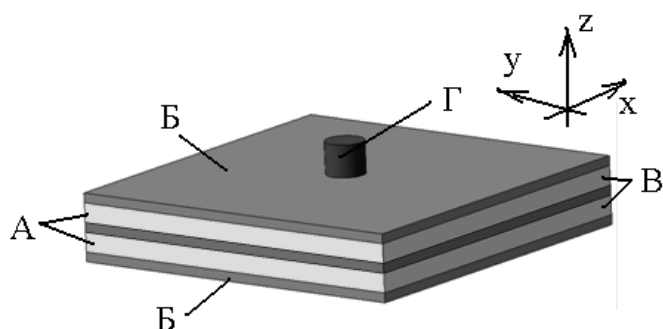


Рис. 1. Твёрдотельная модель фанеры

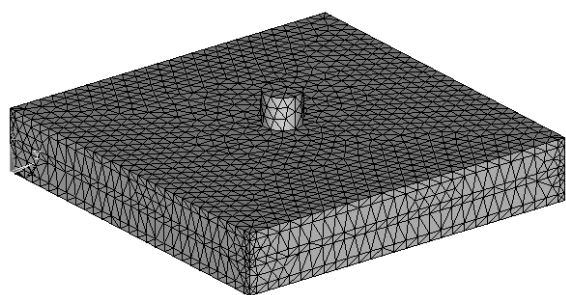


Рис. 2. Конечно-элементная модель (31 тыс. элементов)

Модель закреплялась за две нижние противоположные грани, причем одна грань фиксировалась по трем координатам, а вторая только по двум, тем самым, эмитировалась скользящая опора. Нагрузка 1700 Н прикладывалась к торцу пуансона вертикально вниз. Все слои слоистого материала склеены между собой.

### Результаты

Результаты расчета представлены в виде поля напряжений по Мизесу на рис. 3 и 4.

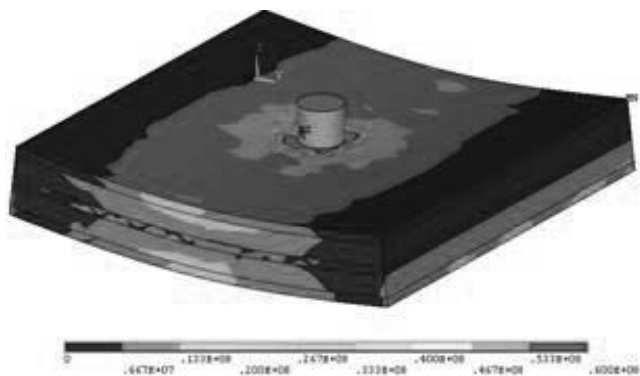


Рис. 3. Поле напряжений

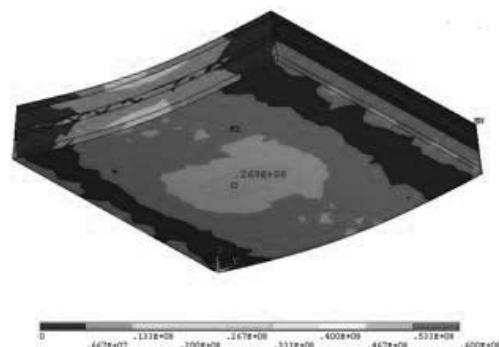


Рис. 4. Поле напряжений, максимальное напряжение 27 МПа

При расчете так же были получены поле перемещений, которое представлены на рис. №5 и рис. 6.

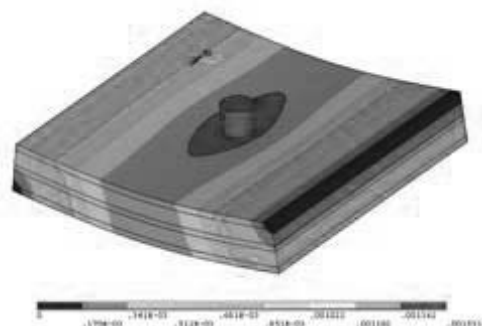


Рис. 5. Поле перемещения

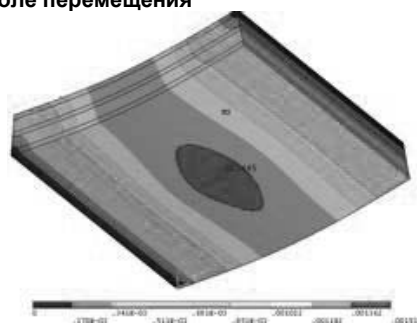


Рис. 6. Поле перемещения, максимальный прогиб 1,45 мм

Далее в модели изменялась толщина РЗС от 1 мм до 3 мм и производился аналогичный расчет, результаты которого представлены в табл. 2 и на графиках (рис.7 и 8).

Таблица 2. Результаты расчета

| Толщина слоя РЗС, мм | Напряжения, МПа | Прогиб |
|----------------------|-----------------|--------|
| 1                    | 98              | 12,8   |
| 2                    | 60              | 5,41   |
| 3                    | 27              | 1,45   |

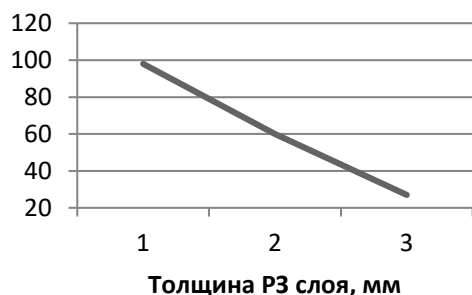


Рис. 7. График зависимости расчетных напряжений от толщины слоев РЗС

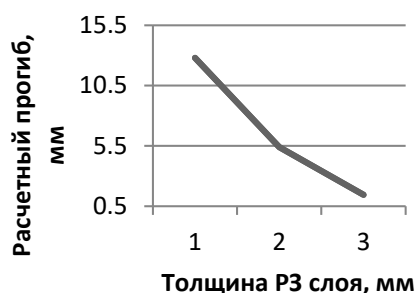


Рис. 8. График зависимости расчетного прогиба от толщины слоев РЗС

Для подтверждения результатов моделирования в лаборатории Уральского государственного лесотехнического университета был проведен эксперимент по определению величины предела прочности при статическом изгибе трехслойной конструкции слоистого материала специального назначения. Эксперимент проводился согласно ГОСТ 9625-87 (СТ СЭВ 2378-80) [11]. Образцы рентгенозащитного материала в количестве 13 штук испытывались на испытательной машине ГМС-50 (с погрешностью измерения нагрузки не более 5%). Нагружение осуществлялось равномерно с постоянной скоростью до полного разрушения образцов. Результаты испытаний представлены в табл. 3 и на графике (рис. 9).

Для трехслойной конструкции слоистого материала при толщине рентгенозащитного слоя 3 мм максимальное напряжение, согласно компьютерным расчетам, составляет 27 МПа, а по результатам лабораторных испытаний - 37 МПа. Величина максимального прогиба – 1,45мм (по результатам моделирования), а при лабораторных испытаниях – 1,8мм.

Таблица 3. Результаты лабораторных испытаний образцов по определению величины предела прочности при статическом изгибе слоистого материала специального назначения

| Размеры образца,<br>b×h, м | Нагрузка<br>разрушаю-<br>щая, F, Н | Изгибаю-<br>щий момент,<br>M, кН*м | Момент<br>сопротивле-<br>ния, W, м <sup>3</sup> | Предел<br>прочности,<br>σ, МПа |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------|
| 0,05×0,016                 | 3,98                               | 0,099                              | 2·10 <sup>-6</sup>                              | 23                             |
| 0,05×0,006                 | 0,87                               | 0,021                              | 0,3·10 <sup>-6</sup>                            | 44                             |
| 0,05×0,006                 | 1,1                                | 0,027                              | 0,3·10 <sup>-6</sup>                            | 46                             |
| 0,05×0,009                 | 1,1                                | 0,027                              | 0,7·10 <sup>-6</sup>                            | 43                             |
| 0,05×0,006                 | 0,95                               | 0,024                              | 0,3·10 <sup>-6</sup>                            | 49                             |
| 0,05×0,008                 | 1,6                                | 0,04                               | 0,5·10 <sup>-6</sup>                            | 46                             |
| 0,05×0,009                 | 1,7                                | 0,042                              | 0,7·10 <sup>-6</sup>                            | 37                             |
| 0,05×0,011                 | 3,1                                | 0,078                              | 1,0·10 <sup>-6</sup>                            | 39                             |
| 0,05×0,008                 | 1,28                               | 0,03                               | 0,5·10 <sup>-6</sup>                            | 40                             |
| 0,05×0,006                 | 0,76                               | 0,019                              | 0,3·10 <sup>-6</sup>                            | 50                             |
| 0,05×0,009                 | 1,2                                | 0,029                              | 0,3·10 <sup>-6</sup>                            | 41                             |
| 0,05×0,011                 | 2,64                               | 0,065                              | 1,8·10 <sup>-6</sup>                            | 30                             |
| 0,05×0,0068                | 1,1                                | 0,027                              | 0,39·10 <sup>-6</sup>                           | 40                             |

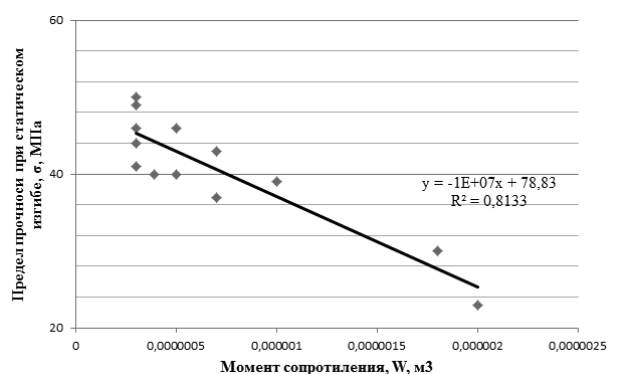


Рис. 9. Зависимость величины предела прочности при статическом изгибе рентгенозащитного материала от величины момента сопротивления

### Заключение

По итогам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. С уменьшением толщины РЗС увеличивается прогиб слоистого материала, но непропорционально. Аналогичная зависимость прослеживается и с напряжением.

2. Отклонения результатов компьютерного моделирования и экспериментальных испытаний составляет около 25%, что можно объяснить неравномерностью пропитки РЗС слоистого материала или же увеличением толщины слоистого материала.

3. Экспериментальные исследования показали, что полученные разрушения клеевого соединения слоистого материала носят адгезионный характер, т.е. наблюдается расслоение образцов на границе раздела фаз «клей – РЗС». Компьютерное моделирование выявило повышение напряжений в зонах склеивания РЗС и внешней стороны шпона. Это объясняется тем, что в процессе склеивания слоистой конструкции часть клея проникая в поры березового шпона образует крепкое клеевое соединение, а в месте соприкосновения клея с РЗС образуется только клеевая пленка. Клей не может проникнуть в твердые слои РЗС.

### Литература

1. Мэттьюз, Ф. Композиционные материалы. Механика и технология /

Ф. Мэттьюз, Р. Ролинге. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.

2. Леонов, В.В. – Материаловедение и технология композиционных материалов / В.В. Леонов, О.А. Артемьева, Е.Д. Кравцова. – Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т, 2007. – 241 с.

3. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. —3-е изд., перераб. и доп. /Ю.М. Лахтин, В. П.Леонтьева. - М. - Машиностроение, 1990. —528с.

4. Васильев, В.В. Композиционные материалы / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

5. Ветошкин Ю.И. Композиционные материалы на основе древесины и их эксплуатационные свойства /Ю.И. Ветошкин, И.В. Коцюба, И.В.Яцун // Часть 1. – Екатеринбург. – 2014. – 116 с. Екатеринбург, 2014. Том Часть 1

6. Перельгин Л.М. Древесиноведение / Л.М. Перельгин. – М.: Лесная пром-сть, 1969. - 320 с.

7. Ветошкин, Ю.И. Конструкции и эксплуатационно-технологические особенности композиционных рентгенозащитных материалов на основе древесины / Ю.И. Ветошкин, И.В. Яцун, О.Н. Чернышев – Екатеринбург. – 2009. – 148 с.

8. Куликов, В.А. Производство фанеры / В.А. Куликов. - М.: Лесн. пром-сть, 1973. – 208 с.

9. Справочное руководство по древесине / пер. с англ. - М.: Лесная промышленность, 1979. - 544 с.

10. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах, Том 1. - 8-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И.Н. Жестковой. - М.: Машиностроение, 2001. - 920 с., ил.

11. ГОСТ 9625-87 (СТ СЭВ 2378-80). Древесина слоистая клееная. Метод определения предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе. Введен 01.01.88. –М.: Изд-во стандартов, 1987 – 7 с.

## Химическая технология древесины

УДК 62-784.43

# ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОМПОЗИЦИИ БУМАГИ НА ОСНОВЕ СТЕКЛЯННЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ АППАРАТОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА ИСПАРИТЕЛЬНОГО ТИПА НА РАЗРЫВНУЮ ПРОЧНОСТЬ И КАПИЛЛЯРНУЮ ВПИТЫВАЕМОСТЬ

А.С. Смолин, Е.В. Дубовой, М.А. Лоренгель, Н.В. Щербак

*Исследовано влияние композиции бумаги на основе стеклянных волокон для аппаратов охлаждения воздуха испарительного типа на разрывную прочность и капиллярную впитываемость. Показано, что варьирование композиции как по волокну, так и по связующему существенно влияет на разрывную прочность и капиллярную впитываемость. Наибольший прирост прочности стекловолокнистой бумаги дает использование в композиции мерсеризованной целлюлозы. Добавка 20% позволяет в два раза повысить прочность на разрыв бумаги.*

*Выполненный цикл исследований позволил получить большой объем информации о свойствах стекловолокнистой бумаги, в зависимости от композиционных и структурно-размерных факторов; результат позволил обоснованно выбрать композицию волокнистой массы для получения стекловолокнистой бумаги со свойствами, необходимыми для элементов прямого испарительного охлаждения воздуха.*

**Ключевые слова:** *стеклянное волокно, суспензия волокна, стекловолокнистая бумага, мерсеризованная целлюлоза, сульфат алюминия, связующее, прочность бумаги на разрыв, впитываемость капиллярная, пористость*

*The effect of compositions based on glass fibers for evaporative-type air cooling equipment on tensile strength and capillary absorption is studied. It is shown that a change in the composition of both the fiber and the binder effect on tensile strength and capillary absorption. The greatest increase in the strength of fiberglass paper is provided by the use of mercerized cellulose in the composition. The addition of 20% doubles the tensile strength of the paper.*

*The performed research cycle made it possible to obtain a large amount of information on the properties of fiberglass paper, depending on the compositional and structural-dimensional factors; the result allowed to selectively choose a pulp composition to produce a fiberglass paper with the properties required for direct evaporative air cooling elements.*

**Keywords:** *glass fiber, fiber suspension, fiberglass paper, mercerized cellulose, aluminum sulfate, binder, tensile strength of paper, capillary absorption capacity, porosity*

### Введение

Потепление климата, происходящее в последние десятилетия, ставит перед человечеством задачи, связанные с разработкой инновационных энергосберегающих экологически безопасных технологий охлаждения воздуха. Охлаждение воздуха имеет большое значение для обеспечения нормальных условий работы и отдыха людей, а также эксплуатации оборудования.

Современные требования к технологии охлаждения воздуха имеют следующие особенности:

1. Возможность широкомасштабного, массового применения устройств охлаждения.
2. Организация работы по энергосберегающему режиму.
3. Экологическая безопасность.
4. Улучшение качества вырабатываемого охладителями воздуха.

Изучение этих требований к современной технологии охлаждения воздуха со всей очевидностью показывают, что удовлетворить им могут только охладители воздуха, использующие не обычный цикл тепловой машины (обратный термодинамический цикл, характерный, например, для фреоновых

кондиционеров), а природные источники холода. Наиболее удобной формой «природного потенциала охлаждения» является поглощение тепла при испарении воды. Это связано прежде всего с исключительно высоким значением скрытой теплоты испарения, общедоступностью и экологической безопасностью этого вещества. К особенностям данной технологии, отличающим ее от близких с технологической точки зрения подходов, относится также применение пластинчатой конструкции теплообменных аппаратов без применения верхнего полива (орошения) испаряющей поверхности. Так возникла необходимость создания принципиально нового капиллярно-пористого материала, обладающего качественно более высоким уровнем эксплуатационных свойств [3-11].

Одним из перспективных микропористых материалов для катриджей аппаратов охлаждения воздуха прямым испарением воды, является бумага на основе стеклянных волокон [7,13-15]. Основные требования к бумаге это высокая капиллярная впитываемость и требуемая механическая прочность, при водо-, хемо- и биостойкости.

Механическая прочность бумаги из стеклянного волокна индивидуальных марок – НТВ 0,10; 2- МТВ-0,25; 3- МТВ-0,40; 4- УТВ-0,60 без добавления связующего, отличается низкой механической прочностью и высокой пористостью. Для использования стекловолоконной бумаги в качестве высокопористых испарительных элементов в аппаратах охлаждения воздуха, представлялось важным найти оптимальную композицию бумаги по диаметру волокна и связующему, обеспечивающую достаточную прочность и максимально возможную капиллярную впитываемость [1-2].

Цель исследования - установление закономерностей влияния композиции стекловолоконной бумаги по диаметру стекловолокна и связующему на механическую прочность и капиллярную впитываемость.

### Методы и материалы

Образцы стекловолоконной бумаги получали в лабораторных условиях из стеклянных волокон четырех марок с использованием в качестве неорганического связующего сульфат алюминия с расходом от 0

до 20% в пересчете на  $Al_2O_3$  шаг 5% и органического связующего мерсеризованной целлюлозы в диапазоне от 0 до 30% с шагом 10 %. Варьирование стеклянных волокон четырех марок (НТВ-0,1; МТВ-0,25; МТВ-0,4; УТВ-0,6) с номинальным диаметром 0,1; 0,25; 0,4; 0,6 мкм в композиции бумаги принято в диапазоне от 0 до 100% с шагом 20%.

### Исследования

Для получения количественных зависимостей прочности стекловолоконной бумаги от композиции по волокну, были изготовлены образцы бумаги примерно равной плотности (массой 1 м<sup>2</sup> 100 г) с различным соотношением волокна 4-х марок и расходе связующего- сульфата алюминия 20% в пересчете  $Al_2O_3$ . Результаты исследования прочности на разрыв и капиллярной впитываемости представлены в таблице 1.

Испарительные элементы – листы бумаги определенных размеров, работают подобно «фитилю» – осуществляют подъем воды по капиллярно-пористой структуре почти без внешней нагрузки. Следовательно, основным фактором качества является впитываемость капиллярная при умеренной прочности листов. Поэтому, выбор необходимого образца бумаги следует делать по фактору максимальной впитываемости.

Наибольшие значения впитываемости и прочности бумаги наблюдаются для марки волокна НТВ-0,1. Учитывая высокую стоимость нанотонкого волокна, экономически приемлемыми вариантами можно признать композиции под номерами 30 и 33. Умеренное содержание самого дорогого волокна в сочетании с прочностью на разрыв 0,86 и 0,79 МПа и впитываемостью капиллярной 148 и 146, позволяет ожидать для этих образцов бумаги требуемых свойств.

Низкая сжимаемость стекловолокна обуславливает прямую зависимость массы 1 м<sup>2</sup> бумаги и толщины, определяющих ее плотность. Соотношение массы 1 м<sup>2</sup> и толщины бумаги важно для физической функциональности испарительных элементов, так как определяют устойчивость листов и производительность по массе поднимаемой воды в единицу времени. В таблице 2 представлены результаты исследования по влиянию массы 1 м<sup>2</sup> стекловолоконной бумаги

на прочность и впитываемость капиллярную для варианта композиции под номером 33 - по

25% 4-х марок волокна и расходе связующего – сульфата алюминия 5% в пересчете на  $Al_2O_3$ .

**Таблица 1 - Влияние композиции стекловолокна на свойства бумаги**

| № композиции | Содержание стекловолокна, % |          |          |          | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Прочность на разрыв, МПа. | Впитываемость капиллярная, мм |
|--------------|-----------------------------|----------|----------|----------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
|              | НТВ-0,10                    | МТВ-0,25 | МТВ-0,40 | УТВ-0,60 |                              |                           |                               |
| 1            | 100                         | -        | -        | -        | 0,25                         | 1,03                      | 147                           |
| 2            | -                           | 100      | -        | -        | 0,24                         | 0,71                      | 145                           |
| 3            | -                           | -        | 100      | -        | 0,24                         | 0,48                      | 102                           |
| 4            | -                           | -        | -        | 100      | 0,25                         | 0,42                      | 100                           |
| 5            | 80                          | 20       | -        | -        | 0,25                         | 1,15                      | 94                            |
| 6            | 60                          | 40       | -        | -        | 0,25                         | 0,77                      | 95                            |
| 7            | 40                          | 60       | -        | -        | 0,24                         | 0,66                      | 101                           |
| 8            | 20                          | 80       | -        | -        | 0,24                         | 0,62                      | 103                           |
| 9            | 80                          | -        | 20       | -        | 0,25                         | 1,1                       | 100                           |
| 10           | 60                          | -        | 40       | -        | 0,24                         | 0,82                      | 111                           |
| 11           | 40                          | -        | 60       | -        | 0,24                         | 0,6                       | 123                           |
| 12           | 20                          | -        | 80       | -        | 0,24                         | 0,32                      | 146                           |
| 13           | 80                          | -        | -        | 20       | 0,25                         | 0,98                      | 108                           |
| 14           | 60                          | -        | -        | 40       | 0,25                         | 0,87                      | 113                           |
| 15           | 40                          | -        | -        | 60       | 0,25                         | 0,72                      | 125                           |
| 16           | 20                          | -        | -        | 80       | 0,25                         | 0,65                      | 131                           |
| 17           | -                           | 80       | 20       | -        | 0,25                         | 0,7                       | 124                           |
| 18           | -                           | 60       | 40       | -        | 0,25                         | 0,62                      | 133                           |
| 19           | -                           | 40       | 60       | -        | 0,25                         | 0,56                      | 143                           |
| 20           | -                           | 20       | 80       | -        | 0,25                         | 0,5                       | 146                           |
| 21           | -                           | 80       | -        | 20       | 0,25                         | 0,79                      | 125                           |
| 22           | -                           | 60       | -        | 40       | 0,24                         | 0,64                      | 135                           |
| 23           | -                           | 40       | -        | 60       | 0,25                         | 0,57                      | 142                           |
| 24           | -                           | 20       | -        | 80       | 0,25                         | 0,48                      | 148                           |
| 25           | -                           | -        | 80       | 20       | 0,25                         | 0,61                      | 150                           |
| 26           | -                           | -        | 60       | 40       | 0,24                         | 0,54                      | 152                           |
| 27           | -                           | -        | 40       | 60       | 0,24                         | 0,52                      | 154                           |
| 28           | -                           | -        | 20       | 80       | 0,25                         | 0,46                      | 138                           |
| 29           | 40                          | 20       | 20       | 20       | 0,25                         | 0,99                      | 128                           |
| 30           | 20                          | 40       | 20       | 20       | 0,25                         | 0,86                      | 148                           |
| 31           | 20                          | 20       | 40       | 20       | 0,25                         | 0,82                      | 137                           |
| 32           | 20                          | 20       | 20       | 40       | 0,25                         | 0,76                      | 126                           |
| 33           | 25                          | 25       | 25       | 25       | 0,24                         | 0,79                      | 146                           |

Анализ экспериментальных данных показывает количественную закономерность

Повышение массы 1 м<sup>2</sup> бумаги, при одинаковой плотности 0,25 г/см<sup>3</sup>, ведет к увеличению толщины, прочности и снижению капиллярной впитываемости, таблица 2.

влияния массы 1 м<sup>2</sup> бумаги на толщину, прочность на разрыв и впитываемость.

Расход минерального связующего – сульфата алюминия, на прочность и впитываемость исследовалась для образцов стекловолнистой бумаги композиции 33, таблица 1. Результаты исследования приведены в таблице 3.

Таблица 2 - Влияние массы 1 м<sup>2</sup> стекловолокнистой бумаги на прочность и впитываемость капиллярную

| Масса 1 м <sup>2</sup> , г | Толщина, мм | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Прочность на разрыв, МПа | Впитываемость капиллярная, мм |
|----------------------------|-------------|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 50                         | 0,2         | 0,25                         | 0,20                     | 161                           |
| 100                        | 0,4         |                              | 0,36                     | 155                           |
| 150                        | 0,6         |                              | 0,52                     | 144                           |
| 200                        | 0,8         |                              | 0,68                     | 135                           |

Таблица 3 - Влияние расхода связующего на свойства стекловолокнистой бумаги, массой 100 г/м<sup>2</sup>

| Расход связующего, % | Прочность на разрыв, МПа | Впитываемость капиллярная, мм | Воздухопроницаемость мл/мин |
|----------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 5                    | 0,36                     | 155                           | 5000                        |
| 10                   | 0,56                     | 153                           | 4550                        |
| 15                   | 0,72                     | 150                           | 2013                        |
| 20                   | 0,79                     | 146                           | 1876                        |

Представленные в таблице 3 результаты исследования показывают, что повышение содержания связующего в бумаге ведет к повышению прочности на разрыв и снижению впитываемости капиллярной. При значительном росте расхода связующего – с 5 до 20% к массе волокна, существенно увеличивается прочность – с 0,36 до 0,79 МПа, но не критично снижается впитываемость – от 155 до 146 мм. Умеренное

снижение впитываемости можно объяснить тем, что флоккулы минерального связующего соразмерны с диаметром волокна (20-80 нм) и образуют единую микропористую матрицу «стекловолокно-связующее». Подтверждением служат электронные микрофотографии фрагментов структуры, пример которой представлен на рисунке 1.

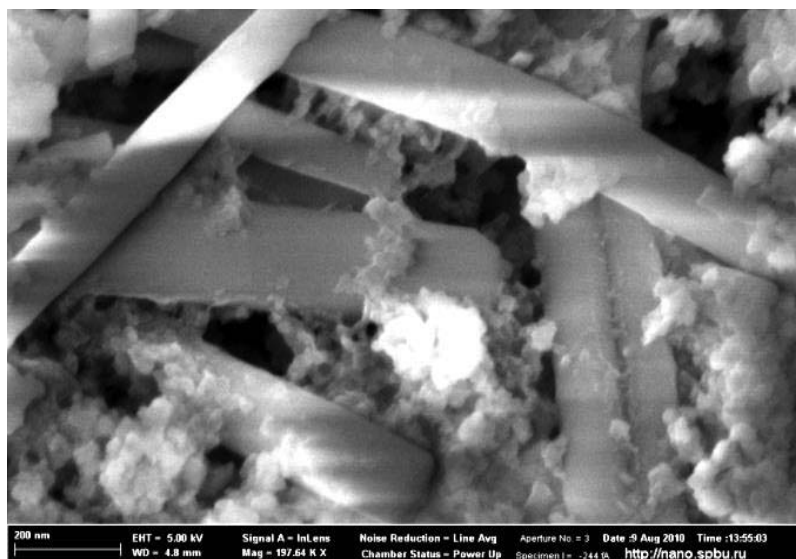


Рис. 1. Электронная фотография фрагмента структуры «стекловолокно-связующее»

Мерсеризованная целлюлоза является традиционным растительным волокном для получения высокопористых видов бумаги, включая фильтровальные. С точки зрения экономической целесообразности,

представлялось обоснованным исследовать композиции стекловолокнистой бумаги с добавлением мерсеризованной целлюлозы. В качестве основы бумаги использовалось стекловолокно МТВ-0,25 с расходом

минерального связующего 20%. Данные эксперимента приведены в таблице 4.

Полученные результаты свидетельствуют о увеличении разрывной прочности бумаги с ростом в композиции содержания мерсеризованной целлюлозы. Добавка 20% целлюлозы дает большой прирост прочности на

разрыв – на 0,61 МПа, в сравнении с чистым стекловолокном (0,71 МПа). Отрицательным воздействием целлюлозы на бумагу является снижение впитываемости капиллярной до 104 мм, против 145 мм для индивидуального стекловолокна.

**Таблица 4 - Влияние мерсеризованной целлюлозы в композиции на свойства минеральноволокнистой бумаги**

| № композиции | Стекловолокно, МТВ-0,25, % | Целлюлоза мерсеризованная, % | Прочность на разрыв, МПа | Впитываемость капиллярная, мм |
|--------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1            | 100                        | –                            | 0,71                     | 145                           |
| 2            | 90                         | 10                           | 0,98                     | 115                           |
| 3            | 80                         | 20                           | 1,32                     | 104                           |
| 4            | 70                         | 30                           | 1,54                     | 92                            |

### Закключение

Исследованы композиционные (состав по волокну, расход связующего) и структурно-размерные (масса 1 м<sup>2</sup>, плотность, толщина) свойства стекловолокнистой бумаги; показано, что композиция стеклянного волокна 4-х марок НТВ 0,10, МТВ-0,25, МТВ-0,40, УТВ-0,60 индивидуально или в смеси оказывают существенное влияние на показатели прочности на разрыв и впитываемость капиллярную; без добавления связующего можно получить, например, предельные величины показателей 1,03 МПа и 147 мм (для нанотонкого волокна МТВ-0,10) и 0,42 МПа и 100 мм (для волокна с наибольшим диаметром УТВ-0,60).

Увеличение массы 1 м<sup>2</sup> стекловолокнистой бумаги, при одинаковой плотности 0,25 г/см<sup>3</sup>, позволяет получить бумагу большей толщины, например, 0,8 мм с прочностью на разрыв 0,68 МПа и впитываемостью 135 мм; при этом, используется композиция из 4-х марок волокна по 25% и минимальное количество связующего – сульфата алюминия, 5% в пересчете на Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Использование минерального связующего – сульфата алюминия, в количестве от 5 до 20% от массы волокна, позволяет повысить прочность бумаги из композиций смешанного волокна, при незначительном снижении капиллярной впитываемости.

### Литература

1. Дубовой Е.В., Свиридов Е.Б., Щербак Н.В., Дубовой В.К. Энергосберегающая экологически безопасная технология охлаждения

воздуха аппаратами испарительного типа. – Изд. Политехнического у-та, СПб, 2017 – С 286.

2. Дубовой В.К. Стекланные волокна. Свойства и применение / В.К. Дубовой. – СПб.: Изд-во Нестор, 2003.- 130 с. – ISBN 5-303-00102-4.

3. Проектирование летнего охлаждения производственных помещений. GoldAir. Адиабатические испарительные охладители. Открытый доступ. Электронный ресурс. [http://losevonline.ru/files/file/Cold%20Air%20calculating%20manual\(1\).pdf](http://losevonline.ru/files/file/Cold%20Air%20calculating%20manual(1).pdf)

4. Кондиционирование. Современные решения. Бытовой испарительный кондиционер CD-ZYEV-06-13B. Открытый доступ. Электронный ресурс. <http://www.comfort-deluxe.ru/index-evacooling1005.html>.

5. Eberspecher. Кондиционеры. Официальный сайт компании. Открытый доступ. Электронный ресурс. <http://www.eberspecher33.ru/conditioners/>

6. World's first personal air cooler. Официальный сайт. Открытый доступ. Электронный ресурс. <https://evapolar.com/>

7. Andrew Industries Limited. Официальный сайт компании <http://www.andrewindustries.com/company/history.cfm>

8. Hollingsworth-vose. Официальный сайт компании. Открытый доступ. Электронный ресурс <http://www.hollingsworth-vose.com/en>

9. ООО «Фильтрующие материалы». Производство воздушных фильтров <http://filtrmat.ru>

10. ООО «НПП «ФОЛТЕР». Фолтер – воздушные фильтры и пылеуловители. <http://www.folter.ru/>

11. ГК «Воздушные фильтры». Российское представительство компании Libeltex, Бельгия [www.filters.ru](http://www.filters.ru)

12. Марийский ЦБК. Официальный сайт компании. Открытый ресурс. <http://marbum.ru/produksiya>

13. Дубовый В.К. Бумагоподобные композиционные материалы на основе минеральных волокон : дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.03. СПб, 2006. 370 с.

14. Мишненкова М.А., Дубовый В.К., Безлаковский А.И. Влияние диаметра

стеклянных волокон на свойства фильтровальных материалов на основе минеральных волокон // Материалы 2-ой междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти проф. В.И. Комарова. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. С.128-132.

15. Мишненкова М.А., Красиков В.Д., Дубовый В.К. Влияние структурных наноразмерных характеристик минерального волокна на проницаемость композитных фильтрационных материалов // Материалы 15-ой междунар. науч.-практич. конф. «Высокие технологии, фундаментальные исследования, финансы». СПб, 2013. С. 186-189.

© А.С. Смолин - д. т. н; профессор «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», [smolin@gturp.spb.rudubovoy.evgeniy@gmail.com](mailto:smolin@gturp.spb.rudubovoy.evgeniy@gmail.com); Е.В. Дубовой - инженер НИЧ «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»; М.А. Лоренгель – аспирант «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»; Н.В. Щербак - к. т. н, доцент «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», [n.sisoeva@narfu.ru](mailto:n.sisoeva@narfu.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 x 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 x 5 см (шрифт «Times New Roman»).

УДК 66.061.3

# СВЕРХКРИТИЧЕСКАЯ ЭКСТРАКЦИЯ СКВАЛЕНА ИЗ СЕМЯН АМАРАНТА

Е.Н. Тремасов, В.В. Губернаторов, А.Е. Воронин, Г.Ф. Илалова

*В данной статье рассмотрен метод экстракции сквалена из семян амаранта сверхкритическим диоксидом углерода в экспериментальной установке компрессорного типа с применением жидкого соразтворителя. Показано существенное увеличение растворимости сквалена с ростом давления, температуры и плотности сверхкритического диоксида углерода.*

**Ключевые слова:** экстракция, сквален, амарант, компрессор, диоксид углерода.

*This article describes the method of extraction of squalene from amaranth seeds by supercritical carbon dioxide experimental facility the compressor type with the use of liquid cerastoides. The significant increase in the solubility of squalene with increasing pressure, temperature and density of supercritical carbon dioxide.*

**Key words:** extraction, squalene, amaranth, compressor, carbon dioxide.

## Введение

В настоящее время огромную популярность получили методы экстракции, благодаря которым происходит полное выделение необходимого вещества и очень малый износ экстракционного оборудования. Методы экстракции наиболее активно применяют в пищевых и биомедицинских технологиях, благодаря этому развитие данной темы имеет огромный потенциал [1-4].

Один из полезных элементов, который можно получить благодаря экстракции называется «сквален» – это терпеновый углеводород, используемый при профилактике и лечении онко- и кардиозаболеваний, лучевой болезни, используется в производстве стероидных гормональных препаратов и косметических средств. В настоящее время источником натурального сквалена служит печень глубоководных акул, благодаря чему он является очень дефицитным и дорогостоящим.

Исходя из этого было принято решение найти более дешевый и доступный альтернативный источник получения сквалена. Этим источником оказался «амарант» – это совершенно новая для нашей страны зерновая культура, которая содержит от 5 до 8 % масла, в состав которого входит сквален. Таким образом, масло амаранта является более приемлемым альтернативным источником получения натурального сквалена [5].

В промышленности развитых стран сформировалась тенденция к ужесточению экологических требований, как к получаемому продукту, так и к условиям его производства. Особенно жесткими эти требования являются в

пищевой и фармацевтической отраслях промышленности.

Для извлечения компонентов растительного сырья в промышленности в основном используются механический отжим биомассы, паровая дистилляция, экстракция органическими растворителями, которые имеют различные вариации перечисленных методов. В случае получения масла из зерновых культур, наряду со сложностью и высокой энергоемкостью традиционной технологии, неизбежен механический износ прессового оборудования, значительно снижающий объемы извлекаемого масла. При этом маслянисть жмыха остается достаточно высокой, что требует доэкстрагирования последнего [6].

Жидкостное экстрагирование, используемое для этого, включает также энергоемкие и сложные процессы регенерации растворителя и выделения экстракта. Последние не обеспечивают полного удаления растворителя из масла и шрота, и тем самым делают их небезопасными для употребления. Процесс дистилляции при повышенных температурах приводит к деградации термолабильных соединений извлекаемого масла [7].

При этом сверхкритическую флюидную технологию извлечения масла из зерновых культур отличают: высокая селективность извлечения; легкость регенерации экстрагента; большой выход, экологичность (отсутствие остаточного растворителя) и качество экстрагируемого продукта; одностадийность операции.

Промышленная реализация экстракции семян амаранта на этапе проектирования

оборудования предполагает исследование характеристик фазового равновесия в системе “масло – целевая компонента – сверхкритический экстрагент” [8].

Таким образом, разработка технологии получения сквалена из семян амаранта с использованием суб- или сверхкритического экстракционного процесса с соответствующим изучением поведения растворимости, прежде всего целевой компоненты в чистом и модифицированном (экономический фактор) сверхкритическом диоксиде углерода, является задачей однозначно актуальной [9].

### Методы и материалы

На рис. 1 представлена схема лабораторной экстракционной сверхкритической установки с компрессорным циклом работы, позволяющая проводить экстрагирование и измерение растворимости веществ в чистом и модифицированном полярным соразтворителем сверхкритическом диоксиде углерода при давлениях до 35 МПа и температурах от 308 до 368 К. Основными узлами и системами установки являются: система регулирования и измерения давления; система регулирования и измерения температуры; экстрактор; система отделения и накопления экстракта; система подачи жидкого соразтворителя и система измерения расхода экстрагента [9-12].

Система регулирования и измерения давления состоит из дожимающего мембранного компрессора МК-80-3,5/350 (3), газового редуктора давления АДН-0063М1 (5) и образцовых манометров (13).

Газ из питательного баллона (11) перекачивается в ресивер (4) дожимающим мембранным компрессором (3), на линии всасывания которого установлен фильтр тонкой очистки (9), предназначенный для отделения газа от возможных механических примесей. Ввиду того, что максимальная степень повышения давления компрессора равна 10, то для достижения давления в ресивере до 40 МПа необходимо обеспечить на входе в компрессор давление не менее 4 МПа.

При необходимости повторного использования диоксида углерода из приемного баллона (10) процесс перекачивания производится в два этапа с использованием питательного баллона (11) в качестве промежуточного.

Из ресивера экстрагент через фильтр-осушитель (6), заполненный цеолитом, подается в газовый редуктор давления (5), с помощью которого устанавливается рабочее давление эксперимента с точностью  $\pm 0.1$  МПа. Необходимо отметить, что давление на входе в редуктор должно быть выше рабочего давления не менее чем на 0.5 МПа [12].

Давление в экстракторе (1) и сепараторе (2) измеряется образцовыми манометрами (13) класса точности 0.2. При работе с мембранным компрессором при заполнении ресивера давление во всасывающих, нагнетательных линиях и питательном баллоне определяется по манометрам размещенным на пульте управления компрессором.

Диоксид углерода перед поступлением в экстрактор предварительно подогревается в нагревателе, помещенном в термостат марки UTU-4, до температуры экстрагирования, превышающей критическую. Для поддержания в экстракторе рабочей температуры процесса, корпус последнего погружен в термостатирующую емкость с точностью поддержания температуры  $\pm 0.05$  К. Для предотвращения преждевременного разделения раствора “сверхкритический диоксид углерода – растворимое вещество” предусмотрен электрообогрев соединительной трубки между экстрактором и дроссельным вентилем. Температура в экстракторе, сепараторе и соединительной трубке контролируется хромель-алюмелевыми термопарами, введенными непосредственно в исследуемую среду через стенки аппаратов высокого давления через специальные уплотнительные устройства. Точность измерения температуры оценивается в пределах  $\pm 0.03$  К.

Использование полярного соразтворителя является одним из основных способов понижения режимных параметров процесса растворения, т.к. наличие в потоке сверхкритического экстрагента полярного соразтворителя в количестве 1÷5 (реже – до 10) % масс. приводит к повышению растворимости слабополярных и полярных соединений кратно и более [13].

Для обеспечения фиксированной подачи соразтворителя в поток экстрагента использовался жидкостный шприцевой насос (16) (рис. 1) с объемом цилиндра 150 см<sup>3</sup>. Ввод соразтворителя осуществляется в газовую

линию между регулятором давления (5) и змеевиковым теплообменником предварительного нагрева (7), в котором осуществляется растворение модификатора в сверхкритическом  $\text{CO}_2$ . Для обеспечения заданного направления движения потоков, разработаны обратные клапаны высокого давления (19), препятствующие проникновению жидкости в газовый редуктор и газа – в шприцевой насос. К седлам клапанов индивидуально были притерты шарики из высоколегированной стали.

Шприцевой насос обеспечивает заданную производительность в диапазоне 0.01-11  $\text{см}^3/\text{мин}$ , что позволяет поддерживать заданную концентрацию сорбатора в потоке экстрагента от 1 до 20 % масс [14].

Установочный патрон с исследуемым веществом взвешивается на электронных весах ЕТ-600-П-Е, помещается в экстрактор и уплотняется затвором. Для вытеснения воздуха экстрактор, сепаратор и

коммуникации несколько раз промываются диоксидом углерода при избыточном давлении до 0.4 МПа.

Далее включается система термостатирования и производится заполнение экстрактора диоксидом углерода со скоростью роста давления  $0.5 \div 1$  МПа/мин. После достижения в экстракторе рабочего давления, вентиль перед экстрактором открывается полностью. После достижения рабочей температуры в экстракторе и прогрева корпуса дроссельного вентиля до  $50-60^\circ\text{C}$  открываются вентили между экстрактором и сепаратором и газ начинает поступать в приемный баллон (10), масса которого постоянно регистрируется с помощью электронных весов (15). Зная массу приемного баллона в начале и конце эксперимента и время процесса экстрагирования можно определить средний расход экстрагента [15].

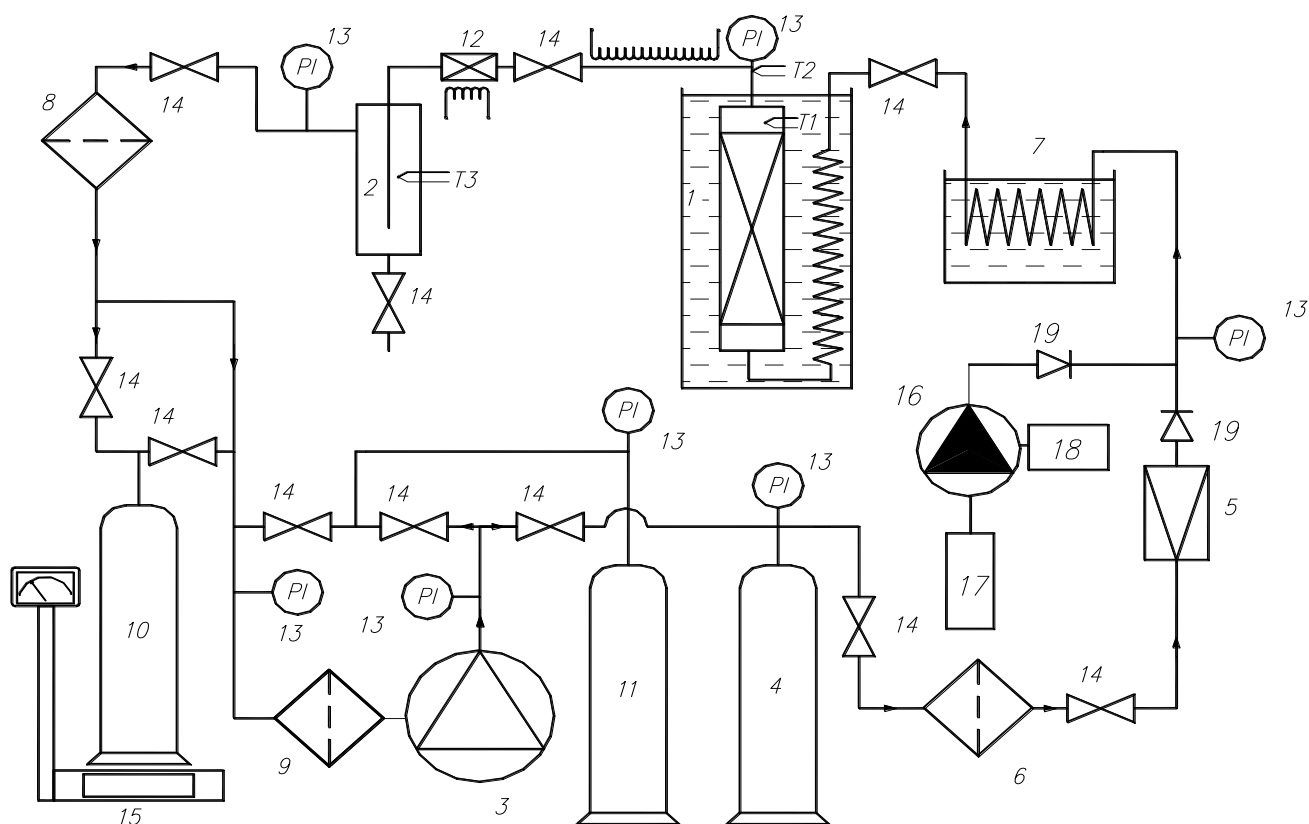


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – экстрактор; 2 – сепаратор; 3 – мембранный компрессор; 4 – ресивер; 5 – редуктор давления; 6, 8 – фильтры-осушители; 7 – теплообменник предварительного нагрева; 10 – приемный баллон; 9 – фильтр тонкой очистки; 11 – питательный баллон; 12 – дросселирующее устройство; 13 – манометры образцовые; 14 – запорная арматура; 15 – электронные весы; 16 – шприцевой насос для подачи жидкого сорбатора; 17 – питательная емкость сорбатора; 18 – электронный блок управления насосом; 19 – обратный клапан; T1-T4 – датчики температуры

При завершении эксперимента вентиль перед экстрактором закрывается и прекращается термостатирование. Отбор экстракта из сепаратора осуществляется при небольшом избыточном давлении  $1.6 \div 2$  МПа. Понижение давления в экстракторе до атмосферного осуществляется через дроссельный вентиль плавно со скоростью не превышающей  $0.5 \div 1$  МПа/мин для предотвращения механического уноса рафината. Пробоотборная емкость и патрон с рафинатом взвешиваются на аналитических весах ЕТ-600-П-Е.

При работе с тройными системами “исследуемое вещество – сверхкритический флюид – соразтворитель” соотношение масс “экстрагент – соразтворитель” устанавливается по заранее измеренному расходу экстрагента.

На электронном блоке управления шприцевого насоса устанавливается подача

соразтворителя, обеспечивающая требуемый состав модифицированного экстрагента, который начинает пропускаться через экстрактор.

Главной целью проведения эксперимента являлось получение сквалена путем экстракции семян амаранта. По этой причине важным этапом являлось определение растворимости сквалена высокой чистоты в сверхкритическом диоксиде углерода в диапазоне температур  $308 \div 328$  К и давлений  $8 \div 33$  МПа [16]. В каждом эксперименте соблюдалось соотношение масс растворяемого вещества и растворителя. Данные представлены на рисунках 2 и 3. Для удобства предварительного анализа данных, точки на отдельных изолиниях (рис. 2) соединены без какого-либо теоретического обоснования. Изолинии растворимостей на рис. 3 получены линейной аппроксимацией экспериментальных данных.

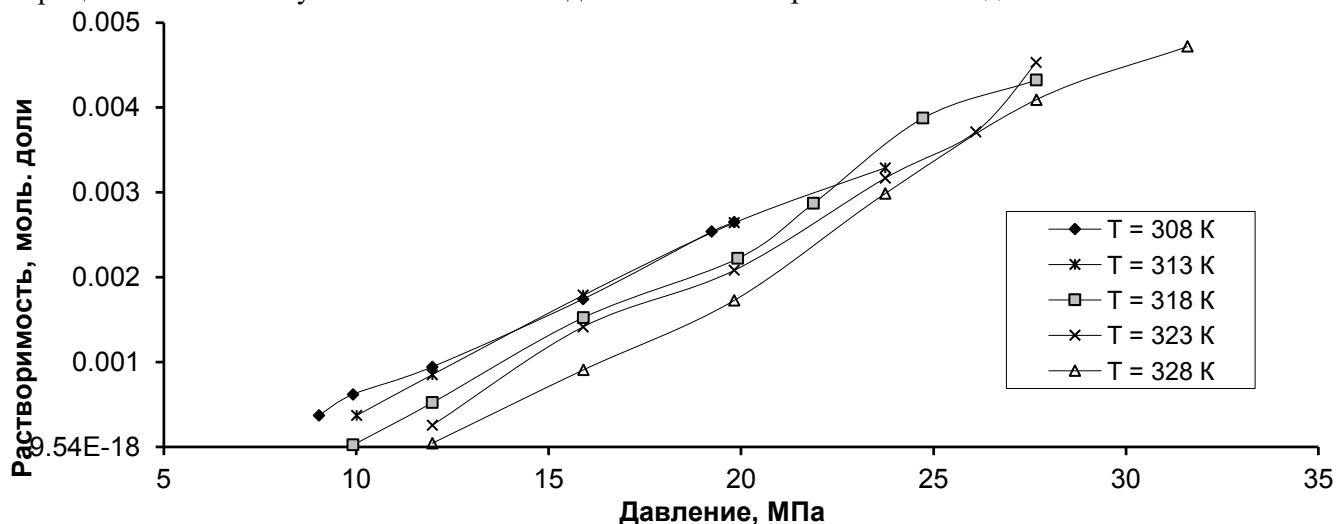


Рис. 2. Растворимость сквалена в зависимости от температуры и давления сверхкритического  $\text{CO}_2$ .

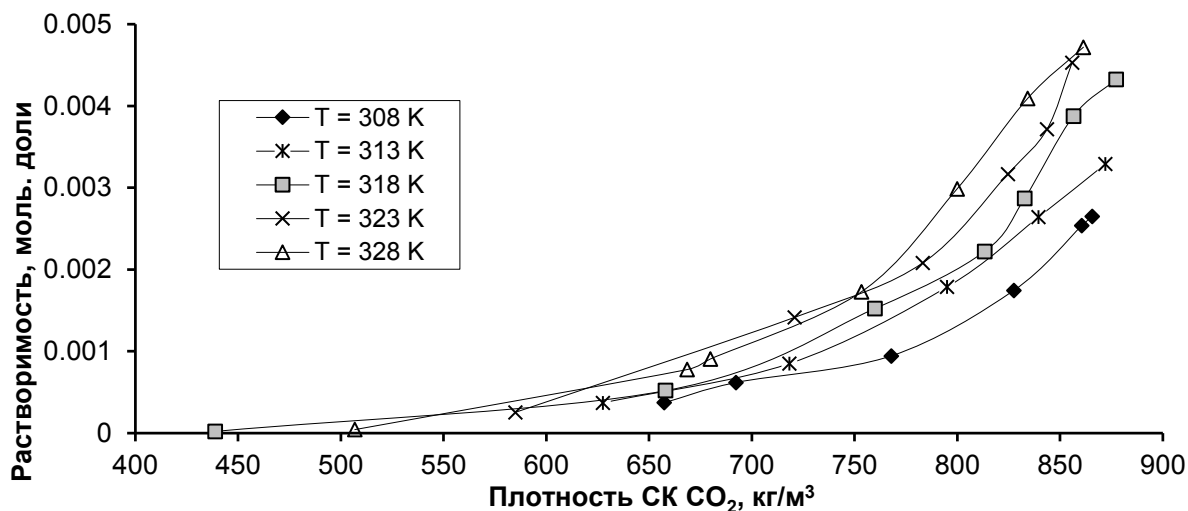


Рис. 3. Растворимость сквалена в зависимости от плотности и температуры сверхкритического  $\text{CO}_2$ .

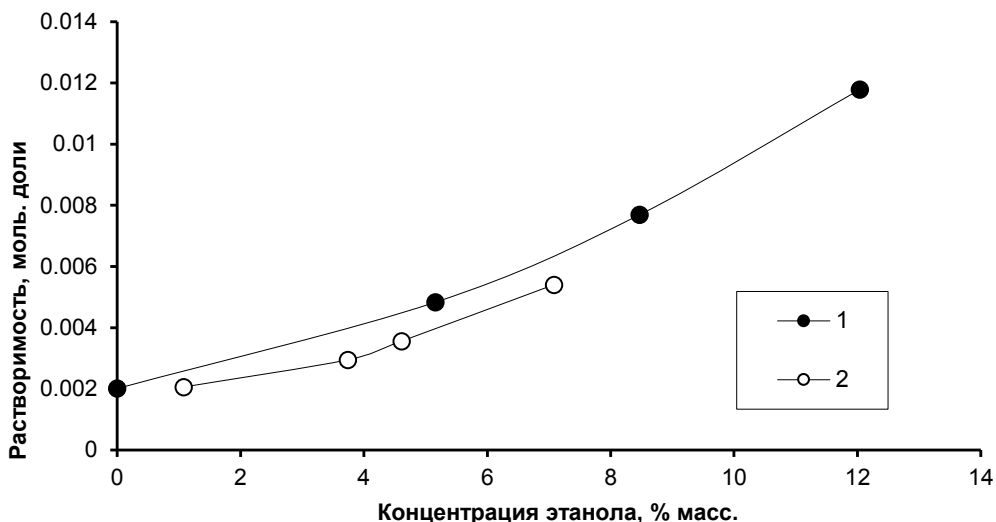


Рис. 4. Растворимость сквалена в сверхкритическом  $\text{CO}_2$ , модифицированном этанолом при параметрах  $P = 20$  МПа и  $T = 333$  К. 1 – [17]; 2 – настоящая работа

Для проверки работоспособности методики и созданной экспериментальной установки были воспроизведены единственные имеющиеся в литературе измерения растворимости сквалена в сверхкритическом  $\text{CO}_2$ , модифицированном этанолом при параметрах  $P = 20$  МПа и  $T = 333$  К, приведенные в работе [17] (рис. 4).

Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами [17] в пределах суммарной погрешности экспериментов. Расхождения результатов, по нашему мнению, могут объясняться, в том числе, разной чистотой сквалена (в работе [17] его чистота составляла 98 %).

### Заклучение

Традиционные методы извлечения масла из семян масличных культур являются весьма сложными, многостадийными, энергоемкими и необеспечивают высокую селективность по отношению к целевому компоненту. Использование жидких экстрагентов не в полной мере отвечает требованиям экологии ввиду наличия остаточного растворителя в продукте.

Предложенный в настоящей работе метод экстрагирования масла из семян амаранта с высоким содержанием сквалена сверхкритическим диоксидом углерода не имеет отмеченных недостатков, обеспечивает высокую селективность и полноту извлечения, получение экологичного продукта с повышенными

бактерицидными и антиоксидантными свойствами.

Благодаря полученным данным, можно сделать вывод о том, что сверхкритическая экстракционная установка на базе дожимающего мембранного компрессора МК-80-3,5/350 позволяет проводить экстрагирование и измерение растворимости твердых и жидких веществ как в чистом, так и модифицированном сверхкритическом диоксиде углерода в диапазоне температур от 308 до 368 К при давлениях до 35 МПа.

### Литература

1. Трemasов Е. Н. Моделирование процесса сверхкритического экстрагирования из растительных клеточных структур / Р.Н. Максудов, П. П. Осипов, Е. Н. Трemasов, Ф.М. Гумеров // Тезисы докладов III международной научно-практической конференции “Сверхкритические флюидные технологии: инновационный потенциал России”. Ростов на Дону. – 2006. – С. 41-43.
2. Губернаторов В.В. Экстрагирование чаги с использованием вакуума / В.В. Губернаторов, Р.Р. Гараев, О.С. Шарычев, Р.Р. Хасаншин, А.В. Сафина // В сборнике: Инновации, качество и сервис в технике и технологиях Сборник научных трудов 7-ой Международной научно-практической конференции. Редколлегия: А.А. Горохов (отв. ред.). 2017. С. 80-83.

3. Сафин Р.Р. Интенсификация процесса предварительной химической обработки древесины в производстве композиционных материалов / Р.Р. Сафин, Ф.В. Назипова, Р.Р. Зиятдинов // В сборнике: Молодые ученые - ускорению научно-технического прогресса в XXI веке сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. Ответственные за выпуск: А.П. Тюрин, В.В. Сяктерева. 2016. С. 931-936.

4. Сафина А.В. Интенсификация процесса водной экстракции чаги путем периодического понижения давления среды / А.В. Сафина, В.В. Губернаторов, Р.Р. Гараев, Е.Ю. Разумов // Деревообрабатывающая промышленность. 2017. № 2. С. 50-53.

5. Тремасов Е.Н. Выделение масла с высоким содержанием сквалена из семян амаранта сверхкритическим диоксидом углерода / Р.Н. Максудов, Е.Н. Тремасов, А.Е. Новиков, Ф. М. Гумеров, В. Ф. Миронов, С.Т. Минзанова, А.Н. Карасева, М.В. Лагоденко // Вестник Казанского технол. ун-та. – 2004. – № 1-2. – с. 172-176.

6. Дзюбинский Р.Н. Качественные показатели переработки маслосемян маслодобывающими предприятиями в 2002 г. / Р.Н. Дзюбинский // Масложировая промышленность. – 2003. – № 2. – С. 6-9.

7. Лобанова А.А. Масло плодов *Viburnum Opulus L.* / А.А. Лобанова, С.В. Сысолятин, Г.В. Сакович, В.Г. Зимица // Химия растительного сырья. – 1999. – № 4. – С. 101-103.

8. Тремасов Е.Н. Описание растворимости сквалена в сверхкритическом диоксиде углерода с использованием уравнения состояния Пенга-Робинсона / Е.Н. Тремасов, Р.Н. Максудов, А.Е. Новиков // Казан. гос. технолог. ун-т. – Казань, 2006. – 10с. – Деп. в ВИНТИ № 775-В2006 от 08.06.06.

9. Тремасов Е.Н. Растворимость целевых компонентов масла семян амаранта в чистом и модифицированном сверхкритическом диоксиде углерода / Р.Н. Максудов, Е.Н. Тремасов, А.Е. Новиков, Ф.М. Гумеров // Тезисы докладов Конференции Российского фонда фундаментальных исследований “Фундаментальная наука в интересах развития критических технологий” с международным

участием. 12-14 сентября 2005 г. Владимир, Новосибирск. – 2005. – С. 254-255.

10. Тремасов Е.Н. Экспериментальная установка для экстрагирования и фракционирования компонентов растительного сырья / Р.Н. Максудов, Е.Н. Тремасов, М.Ю. Фирсова, А.Е. Новиков и А.А. Сагдеев // Материалы X Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ. Казань. – 2002. – С. 236-239.

11. Тремасов Е.Н. Экспериментальная установка для экстрагирования компонентов растительного сырья в сверхкритических флюидах / Е.Н. Тремасов, Р.Н. Максудов, Ф.М. Гумеров // Материалы докладов Всероссийской школы-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В. Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». Казань. – 2002. – С. 130-131.

12. Тремасов Е.Н. Растворимость сквалена в сверхкритическом диоксиде углерода / Е.Н. Тремасов, Р.Н. Максудов, А.Е. Новиков, Truong Nam Hung, Ф.М. Гумеров // Материалы XI Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ. В 2-х томах. Том 1. Санкт-Петербург. – 2005. – С. 103-104.

13. Тремасов Е.Н. Экспериментальная установка для проведения процессов сверхкритической флюидной экстракции с использованием жидкого соразтворителя / Р.Н. Максудов, А.Е. Новиков, Е.Н. Тремасов, Ф.М. Гумеров // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2004. – № 1-2. – С. 168-172.

14. Тремасов Е.Н. Экстрагирование масла из семян амаранта сверхкритическим диоксидом углерода / Е.Н. Тремасов, А.В. Прокофьев, Р.Н. Максудов // Материалы Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология». Казань. – 2005. – С. 114-117.

15. Тремасов Е.Н. Исследование экстракции масла из семян амаранта и измерение растворимости сквалена в сверхкритическом диоксиде углерода / Р.Н. Максудов, Е.Н. Тремасов, А.Е. Новиков, Truong Nam Hung, Ф.М. Гумеров // Вестник

Казан. технол. ун-та. – 2005. – № 1. – С. 279-285.

16. Трemasов Е.Н. Экстрагирование масла из семян амаранта и измерение растворимости сквалена в чистом и модифицированном сверхкритическом диоксиде углерода / Р.Н. Максудов, Е.Н. Трemasов, А.Е. Новиков, Ф.М. Гумеров // Тезисы докладов II международной научно-практической

конференции “Сверхкритические флюидные технологии: инновационный потенциал России”. Ростов на Дону. – 2005. – С. 62-65.

17. Owen J. Catchpole. Solubility of fish oil components in supercritical CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> + ethanol mixtures / Owen J. Catchpole, John B. Grey, and Kirstine A. Noermark // Chem. Eng. Data. – 1998. – Vol. 43. – № 6. – P. 1091-1095.

© **Е.Н. Трemasов** – к.т.н., помощник проректора по ЭИ, Ведущий инженер ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»; **В.В. Губернаторов** – ассистент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Valera\_gub@mail.ru; **А.Е. Воронин** – к.т.н., доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», archiwood@kstu.ru; **Г.Ф. Илалова** – ассистент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

УДК 662.76 (045)

## ГЕНЕРАТОРНЫЙ ГАЗ ИЗ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ КАК АЛЬТЕРНАТИВА ПРИРОДНОМУ ГАЗУ В КОТЛОАГРЕГАТАХ

**В. Н. Диденко, Е.М. Кашин**

*Получены соотношения для определения количества газогенераторов различных типов, обеспечивающих требуемую мощность котельных агрегатов, переводимых с природного газа на генераторный. Соотношения конкретизированы для газогенераторов прямой, обращенной схем газификации и газогенераторов роторного типа, использующих сырье из отходов древесной или лесной промышленности.*

**Ключевые слова:** генераторный газ, количество газогенераторов, газогенератор прямой схемы, газогенератор обращенной схемы, газогенератор роторного типа.

*The article provides the determination of gas generators amount, that provide the required power of natural gas boilers. The direct scheme, the inverse scheme and the rotor type are main research schemes.*

**Key words:** gasifier gas, gas generators amount, direct scheme gasifier, inverse scheme gasifier and rotor type gas generator.

### Введение

Актуальность исследования обусловлена повышением энергетических потребностей человечества, нестабильностью рынка нефте- и газопродуктов, истощенностью запасов ископаемых топлив, а также необходимостью замены части невозобновляемого топлива возобновляемым, в частности генераторным газом, получаемым из древесины или древесных отходов. В настоящее время применение генераторного газа как альтернативного источника энергии так и не получило должного распространения в виду

многих причин, одной из которых является низкая мощность газогенераторных установок. В связи с этим весьма востребованной представляется задача рационального подбора типа и количества газогенераторов, обеспечивающих полноценную работу существующих энергетических установок, на древесном топливе.

### Методы и материалы

В данной работе рассматриваются энергетические аспекты полного перевода существующих котлов с природного на генераторный газ. Используются методики

расчета теплоты сгорания топлива, выхода продуктов сгорания, определения количества воздуха, необходимого для сжигания. Объектами исследования являются газогенераторы прямой, обращенной схемы, а также газогенератор нового типа с вращающейся активной зоной (газогенератор роторного типа).

### Результаты

Расход любого газообразного топлива  $G_{\Gamma}$ , необходимый для обеспечения заданной мощности котлоагрегата, определялся из энергетического баланса:

$$G_{\Gamma} = \frac{Q_K \cdot 3600}{Q_H \cdot \eta_{KA}}, \frac{\text{м}^3}{\text{час}}; \quad (1)$$

где:  $\eta_{KA}$  - коэффициент полезного действия котельного агрегата;  $Q_H$  - низшая теплота сгорания используемого газообразного топлива;

$$Q_H = 127,5 \text{ CO} + 108,1 \text{ H}_2 + 358,8 \text{ CH}_4, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}; \quad (2)$$

Средний элементарный состав древесного сырья [1, 2]:

$$W^P = 17\%; A^c = 0,7\%; C^T = 50,0\%;$$

$$H^T = 6,0\%; O^T = 43,0\%; N^T = 1,0\%.$$

Состав генераторного газа из древесного сырья зависит от схемы газификации (табл.1).

При  $\eta_{KA} = \text{const}$ , отношение расходов генераторного (далее «ГГ») и природного (далее «пр.Г») газов, обеспечивающих требуемую мощность любого котла, равно:

$$\frac{G_{\Gamma\Gamma}}{G_{\text{пр.Г}}} = \frac{Q_{H \text{ пр.Г}}}{Q_{H \Gamma\Gamma}}; \quad (3)$$

где  $G_{\text{пр.Г}}$ ,  $Q_{H \text{ пр.Г}}$  - расход и низшая теплота сгорания природного газа;  $G_{\Gamma\Gamma}$ ,  $Q_{H \Gamma\Gamma}$  - расход и низшая теплота сгорания генераторного газа.

Количество воздуха, необходимое для сжигания 1  $\text{м}^3$  газа:

$$L_0 = [0,5(\text{CO} + \text{H}_2) + 2\text{CH}_4 - \text{O}_2]/21, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \quad (4)$$

Коэффициент полезного действия газогенератора:

$$\eta_{\Gamma} = V_g Q_H / (Q_H^P)_{\Gamma}; \quad (5)$$

где:  $(Q_H^P)_{\Gamma}$  - низшая теплота сгорания газифицируемого сырья, кДж/кг.

Выход сухого газа из 1 кг газифицируемого древесного сырья определялся по формулам:

$$V_g = \frac{22,4(C^P - C_n)}{12(\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4)} = \frac{1,867(C^P - C_n)}{\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad (6)$$

$$C^P = C^T(100 - A^c)(100 - W^P)/100; \quad (7)$$

где:  $C^P$ ,  $C^T$ ,  $C^c$  - содержание углерода соответственно в рабочей, горючей и сухой массах, %;  $C_n$  - потери углерода в очаговых остатках и в виде пыли (принято 2 %);  $W^P$  - содержание влаги в рабочей массе, %;  $A^c$  - содержание золы в сухой массе, %.

Результаты определения по формулам (2-7) средних значений энергетических характеристик древесного генераторного газа и газогенераторов представлены в табл. №2.

В расчетах принято: для природного газа  $Q_{H \text{ пр.Г}} = 34,94 \text{ МДж/м}^3$ , для древесного сырья -  $(Q_H^P)_{\Gamma} \approx 20,0 \text{ МДж/кг}$ .

Выводы из анализа таблицы 2:

- Прямая схема газификации древесного сырья, предусматривающая дожигание смолистых продуктов газификации, по сравнению с обращенной схемой, обеспечивает увеличение теплоты сгорания генераторного газа на 18% и соответствующее увеличение коэффициента полезного действия газогенератора с 58,0 до 61,4 %.

- С целью сохранения мощности котла при переводе с природного газа на генераторный, расход генераторного газа прямой схемы газификации должен превышать расход природного газа с  $Q_{H \text{ пр.Г}} = 34,94 \text{ МДж/м}^3$  в 5,773 раза, а при использовании газогенераторов с обращенной схемой газификации - в 6,811 раз.

- Количество воздуха, необходимое для полного сжигания 1  $\text{м}^3$  генераторного газа, составляет 1,262  $\text{м}^3$  при прямой схеме газификации и 1,088  $\text{м}^3$  - при обращенной, что почти в 9 раз меньше чем для сжигания 1  $\text{м}^3$  природного газа. Поэтому, при переводе котла на генераторный газ с расходом, увеличенным по сравнению с природным газом в 5,8 - 6,9 раз, объем продуктов сгорания генераторного газа получается в итоге меньше, чем у природного. Таким образом, для адаптации существующих котлов к низкокалорийному генераторному газу, возможно, потребуется только модернизация (или замена) горелочных устройств и топливопроводов, без изменения топочной и конвективной частей котла.

Авторами в работе [3] была получена формула (8) для количества газогенераторов с цилиндрической шахтой, обеспечивающих требуемую мощность котла:

$$n = Q_K \cdot \frac{1}{\eta_{\Gamma}} \cdot \frac{1}{\eta_{КА}} \cdot \frac{1}{q_{ТП}} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D_{Ш}^2}; \quad (8)$$

$$q_{ТП} = \frac{B_T^I \cdot (Q_H^P)_T}{4\pi \cdot D_{Ш}^2 / 4}, \frac{\kappaДж}{м^2 \cdot час}; \quad (9)$$

где:  $q_{ТП}$  - «тепловое напряжение поперечного сечения шахты», величина интегрально характеризующая массовую скорость газификации и действительную форму поверхности активной зоны в газогенераторе с заданными видом сырья и схемой газификации;  $B_T^I$  - расход сырья в газогенераторе, кг/час;  $D_{Ш}$  - диаметр шахты газогенератора, м.

В общем случае для газогенераторов любой конструкции:

$$n = S_{ЗГ} / F_{Ш}; \quad (10)$$

где:

$$S_{ЗГ} = Q_K \cdot \frac{1}{\eta_{\Gamma}} \cdot \frac{1}{\eta_{КА}} \cdot \frac{1}{q_{ТП}}, м^2; \quad (11)$$

$F_{Ш}$  - площадь колосниковой решетки шахты (для цилиндрической шахты  $F_{Ш} = \pi \cdot D_{Ш}^2 / 4$ ).

По своей сути  $S_{ЗГ}$  - это требуемая для обеспечения работы котла заданной мощности, площадь проекции действительной поверхности активной зоны газогенератора на плоскость колосниковой решетки.

На основании работ [1, 4, 5, 6] для газогенераторов с прямой схемой газификации древесины принято:

$$q_{ТП} = 5,45 \cdot 10^6, \kappaДж / (м^2 \cdot час),$$

а для газогенераторов с обращенной схемой

$$- q_{ТП} = 12,72 \cdot 10^6, \kappaДж / (м^2 \cdot час).$$

Таблица 1 - Средний состав генераторного газа при различных схемах газификации древесного сырья [1, 2]

| Схема газификации | Средний состав древесного генераторного газа, % по объему |                |                |      |                |                 | Общее содержание горючих веществ, % по объему |
|-------------------|-----------------------------------------------------------|----------------|----------------|------|----------------|-----------------|-----------------------------------------------|
|                   | CO <sub>2</sub>                                           | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CO   | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> |                                               |
| Прямая            | 5,75                                                      | 0,2            | 50,7           | 27,1 | 12,9           | 3,35            | 43,35                                         |
| Обращенная        | 10                                                        | 0,2            | 50,7           | 19,5 | 14,5           | 3,0             | 37%                                           |

Таблица 2 - Средние значения энергетических характеристик древесного генераторного газа и газогенераторов

| Схема газификации | $Q_{НГТ}, \kappaДж / м^3$ | $G_{ГТ} / G_{ПР.Г}$ | $L_0, м^3 / м^3$ | $V_g, м^3 / кг$ | $\eta_{\Gamma}, \%$ |
|-------------------|---------------------------|---------------------|------------------|-----------------|---------------------|
| Прямая            | 6052                      | 5,773               | 1,262            | 2,03            | 61,4                |
| Обращенная        | 5130                      | 6,811               | 1,088            | 2,26            | 58,0                |

На рис. 1 представлены графики, построенные по зависимостям (9, 10, 11), для определения количества газогенераторов с цилиндрической шахтой. Графики являются универсальными для обеих схем газификации.

При этих значениях  $q_{ТП}$  и  $\eta_{\Gamma}$  из табл.1, по формуле (8) получены соотношения для расчета количества газогенераторов, обеспечивающих требуемую мощность котла.

Для прямой схемы газификации:

$$n_{ПР} = 1076,4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{Q_K}{\eta_{КА}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot D_{ШПР}^2 / 4}; \quad (12)$$

Для обращенной схемы газификации:

$$n_{ОБР} = 487,8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{Q_K}{\eta_{КА}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot D_{ШПР}^2 / 4}; \quad (13)$$

Из (10) и (11) следует, что отношение количества газогенераторов обращенной схемы к количеству газогенераторов с прямой схемой газификации при одинаковой мощности котла обратно пропорционально квадрату отношения диаметров их шахт  $D_{Ш}$ . При равенстве  $D_{Ш}$  и одинаковой мощности котла, количество газогенераторов с обращенной схемой будет в 2,207 раза меньше числа газогенераторов с прямой схемой.

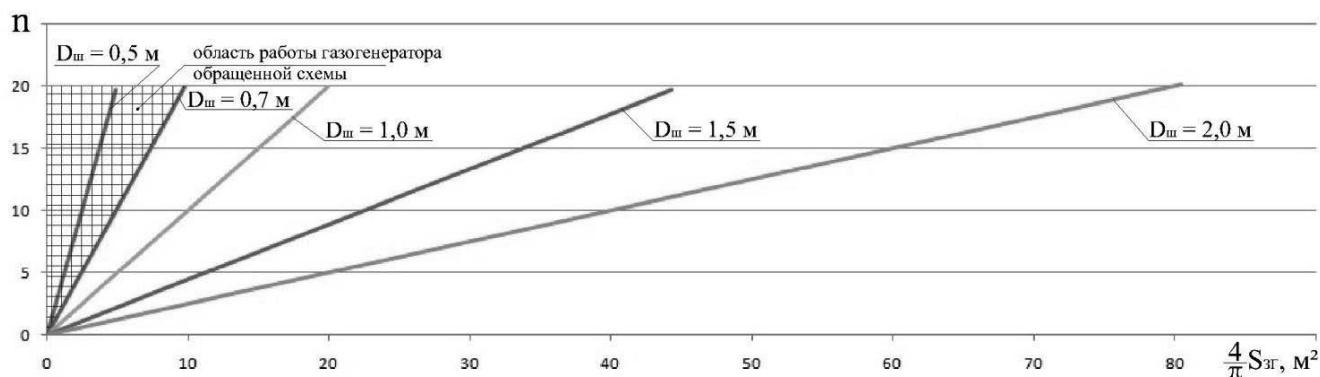


Рис.1. Графики для определения количества газогенераторов с цилиндрической шахтой прямой и обращенной схем газификации

Но при отношении  $D_{ш\text{ пр}}/D_{ш\text{ обр}}$ , превышающем 1,4855, количество газогенераторов обращенной схемы становится больше числа газогенераторов прямой схемы. У газогенераторов с обращенной схемой газификации диаметр шахты газогенератора ограничивается [7] размером  $D_{ш} = 0,7\text{ м}$ , в то время как у газогенераторов прямой схемы газификации такого ограничения нет.

Для равенства числа газогенераторов обращенной ( $D_{ш} = 0,7\text{ м}$ ) и прямой схем, у газогенераторов прямой схемы диаметр шахты должен быть равен  $D_{ш} = 1,0398\text{ м}$ .

Максимальная мощность котла, обеспечиваемая одним газогенератором с любой схемой газификации равна:

$$Q_K = \eta_{ГГ} \cdot \eta_{КА} \cdot q_{ПГ} \cdot \pi \cdot D_{ш}^2 / 4; \quad (14)$$

Следовательно, один газогенератор обращенной схемы с предельным диаметром

шахты 0,7м может обеспечить работу котла с максимальной мощностью  $Q_K = 725,21\text{ кВт}$

Если диаметр шахты газогенератора прямой схемы газификации ограничить шириной кузова автомобиля, то есть принять  $D_{ш} = 2,0\text{ м}$ , то максимальная мощность котла, обеспечиваемая одним таким газогенератором, составит  $Q_K = 2685,21\text{ кВт}$ .

Результаты расчетов требуемого количества газогенераторов прямой и обращенной схем газификации для водогрейных котлов серии КВГМ представлены в табл. 3 и табл.4.

В частности получено, что для котлоагрегатов с мощностью до 8 МВт, количество газогенераторов с цилиндрической шахтой и прямой схемой газификации древесины не превышает  $n = 3$ , что вполне приемлемо для практики.

Таблица 3 - Таблица расчета количества газогенераторов с цилиндрической шахтой и прямой схемой газификации для перевода котлов серии КВГМ на древесный генераторный газ

| Характеристики котла и газогенератора | Марка котла   |          |                |                |                |                 |                 |              |
|---------------------------------------|---------------|----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------|
|                                       | КВЕ-0,7-115Гн | КВ-1,6ГМ | КВ-ГМ-2,9-150С | КВ-ГМ-4,65-150 | КВ-ГМ-7,56-150 | КВ-ГМ-11,63-150 | КВ-ГМ-23,26-150 | КВ-ГМ-35-150 |
| $Q_K, \text{МВт}$                     | 0,7           | 1,6      | 2,9            | 4,65           | 7,65           | 11,63           | 23,26           | 35           |
| $\eta_{КА}$                           | 0,86          | 0,91     | 0,92           | 0,92           | 0,92           | 0,92            | 0,92            | 0,91         |
| $\eta_{ГГ\text{ пр}}$                 | 0,614         | 0,614    | 0,614          | 0,614          | 0,614          | 0,614           | 0,614           | 0,614        |
| $q_{ПГ}, \text{МВт}/\text{м}^2$       | 1,513         | 1,513    | 1,513          | 1,513          | 1,513          | 1,513           | 1,513           | 1,513        |
| $4S_{3Г}/\pi, \text{м}^2$             | 1,12          | 2,41     | 4,32           | 6,93           | 11,40          | 17,32           | 34,65           | 52,71        |
| $D_{ш\text{ пр}}, \text{м}$           | 2,00          | 2,00     | 2,00           | 2,00           | 2,00           | 2,00            | 2,00            | 2,00         |
| $n_{\text{пр}}$                       | 0,3           | 0,6      | 1,1            | 1,7            | 2,8            | 4,3             | 8,7             | 13,2         |

Как следует из (8), количество газогенераторов, обеспечивающих работу котла с требуемой мощностью, обратно пропорционально площади активной зоны газификации. Авторами предложен [7, 8, 9, 10] новый тип газогенератора: газогенератор роторного типа, позволяющий существенно увеличить площадь активной зоны газификации [9]. У газогенераторов прямого и обращенного процессов газификации активная зона имеет форму диска. В газогенераторах роторного типа форма активной зоны газификации близка к цилиндрической, способной увеличиваться по высоте, вплоть до высоты ротора газогенератора.

Определение количества газогенераторов роторного типа и сравнение его с количеством газогенераторов других типов проводилось по следующим формулам.

Для определения количества газогенераторов роторного типа и сравнения его с количеством газогенераторов других типов получено:

$$n_p = 1076,4 \cdot 10^{-6} \frac{Q_K}{\eta_{KA} F_{3Г}} = 1076,4 \cdot 10^{-6} \frac{Q_K}{\eta_{KA} \pi D_{PG} H}; \quad (15)$$

$$\frac{n_{ПП}}{n_p} = \frac{4H}{D_{III}}; \quad (16)$$

$$\frac{n_{ОБР}}{n_p} = \frac{1,81271 \cdot H}{D_{III}}; \quad (17)$$

где  $F_{3Г}$ ,  $H$  площадь и высота активной зоны газификации (здесь  $F_{3Г} = F_{III}$ ),

$D_{PG}$  – некоторый диаметр цилиндрической поверхности зоны газификации, эквивалентный  $D_{III}$ .

Таким образом, число газогенераторов роторного типа в  $(4H/D_{III})$  раз меньше количества газогенераторов с прямой схемой газификации и в  $(1,81271 H/D_{III})$  раз меньше количества газогенераторов с обращенной схемой газификации. Преимущество газогенератора роторного типа возрастает с увеличением  $H$ . Так при роторе с  $H = 2,47 м$  и  $D_{PG} = 0,7 м$ , один газогенератор роторного типа способен полностью обеспечить работу котла КВ-ГМ-4,65-150.

Препятствием для широкого распространения газогенераторов роторного типа пока являются проблемы, связанные с ресурсом работы ротора.

Таблица 4. - Таблица расчета количества газогенераторов с цилиндрической шахтой и обращенной схемой газификации для перевода котлов серии КВГМ на древесный генераторный газ

| Характеристики котла и газогенератора | Марка котла   |          |                |                |                |                 |                 |              |
|---------------------------------------|---------------|----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------|
|                                       | КВЕ-0,7-115Гн | КВ-1,6ГМ | КВ-ГМ-2,9-150С | КВ-ГМ-4,65-150 | КВ-ГМ-7,56-150 | КВ-ГМ-11,63-150 | КВ-ГМ-23,26-150 | КВ-ГМ-35-150 |
| $Q_K, МВт$                            | 0,7           | 1,6      | 2,9            | 4,65           | 7,65           | 11,63           | 23,26           | 35           |
| $\eta_{KA}$                           | 0,86          | 0,91     | 0,92           | 0,92           | 0,92           | 0,92            | 0,92            | 0,91         |
| $\eta_{Г ОБР}$                        | 0,58          | 0,58     | 0,58           | 0,58           | 0,58           | 0,58            | 0,58            | 0,58         |
| $q_{III}, МВт/м^2$                    | 3,533         | 3,533    | 3,533          | 3,533          | 3,533          | 3,533           | 3,533           | 3,533        |
| $4S_{3Г}/\pi, м^2$                    | 0,51          | 1,09     | 1,96           | 3,14           | 5,17           | 7,86            | 15,72           | 23,91        |
| $D_{III ОБР}, м$                      | 0,70          | 0,70     | 0,70           | 0,70           | 0,70           | 0,70            | 0,70            | 0,70         |
| $n_{ОБР}$                             | 1,03          | 2,23     | 4,00           | 6,41           | 10,55          | 16,04           | 32,07           | 48,79        |

### Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что генераторный газ из древесных отходов является реальной альтернативой природному газу в качестве котельного топлива.

Полученные соотношения для определения энергетических характеристик и количества газогенераторов различных типов, использующих сырье из отходов древесной и лесной промышленности, могут быть полезны при решении практических задач энергосбережения, использования

возобновляемых источников энергии и экологии.

### Литература

1. Токарев Г. Г., Газогенераторные автомобили. – М.:Машгиз, 1955. – 206 с.
2. Кашин Е.М., Диденко В.Н. История развития газогенераторов / Е.М. Кашин, В.Н. Диденко, – Ижевск: издательство ФГБОУ ВПО ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2013. – 76 с.
3. Диденко В.Н., Кашин Е.М. Энергетические аспекты полного перевода котлоагрегатов с природного на генераторный газ // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. №3. – 97 с..
4. Юдушкин Н.Г., Газогенераторные тракторы. Теория, конструкция и расчет. – М.:Машгиз, 1955. – 244 с.
5. Кашин Е.М., Диденко В.Н. Установки для получения генераторного газа / Е.М. Кашин, В.Н. Диденко, – Ижевск:

издательство ФГБОУ ВПО ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2013. – 96 с.

6. Коллеров Л. К. Газомоторные установки. – М.;Л.:Машгиз, 1951. – 240 с.

7. Диденко В.Н., Кашин Е.М. Активные зоны газогенератора твердого топлива роторного типа // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. №2. – 204 с.

8. Диденко В.Н., Кашин Е.М. Определение величины активной зоны газогенератора роторного типа // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. №2. – 178 с.

9. Пат. 2579112 Российская Федерация, МПК F23G5/027, C10J3/00. ГАЗОГЕНЕРАТОР ТВЕРДОГО ТОПЛИВА / Кашин Е.М., Диденко В.Н.; заявитель и патентообладатель: Кашин Е.М., Диденко В.Н. – 2014144242/03; заявл. 31.10.2014; опубл. 27.03.2016.

10. Диденко В.Н., Кашин Е.М. Методика определения предельных значений затрат энергии на привод газогенератора роторного типа // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. №3. – 97 с.

© **В.Н. Диденко** - д.т.н., профессор ФГБОУ ВО "Ижевский государственный технический Университет им. М.Т. Калашникова", [tguug@istu.ru](mailto:tguug@istu.ru); **Е.М. Кашин** - выпускник аспирантуры ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова», [KawuH@yandex.ru](mailto:KawuH@yandex.ru)

УДК 615.322

## СВЕРХКРИТИЧЕСКАЯ ФЛЮИДНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ ПЕНТАХЛОРФЕНОЛА ИЗ ПРОПИТАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

**Е.Н. Трemasов, А. Р. Мухтарова, А.В. Сафина, Г.Ф. Илалова**

*В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что скорость экстракции увеличилась с увеличением давления и температуры экстрагента, что происходило из-за увеличения комбинированного коэффициента массопередачи. Получена регрессионная модель зависимости процентного выхода ПХФ от режимных параметров экстрагента.*

*Ключевые слова: древесина, моделирование, сверхкритическая жидкость, экстракция, пентахлорфенол.*

*As a result of the experimental studies, it was found that the extraction rate increased with increasing pressure and temperature of the extractant, which was due to an increase in the combined mass transfer coefficient. A regression model of the percentage yield of PCPs on the extractant regime parameters was obtained.*

*Key words: wood, modeling, supercritical fluid, extraction, pentachlorophenol.*

### Введение

В настоящее время в связи с интенсивным ростом строительства в России возникает ряд новых проблем, связанных, в частности, с

защитой строительных материалов от действия различных повреждающих факторов.

Известно, что деревянные материалы даже в условиях средних широт подвержены воздействию плесневых и дереворазрушающих

грибов, бактерий, насекомых, обрастающей растительности.

Решением данной проблемы является обязательная профилактическая обработка всех строительных материалов соответствующими препаратами, иначе деревянные конструкции будут подвержены губительному действию бактерий, плесени, гнилей, мха, лишайников, насекомых.

Пентахлорфенол (ПХФ) до конца 70-х гг. XX в. находил широкое применение как фунгицид для защиты древесины. Несмотря на запрет его применения, все еще находятся в обиходе обработанные этим соединением предметы.

Основной путь поступления ПХФ в организм - пищеварительный тракт. В среднем в организм человека ежедневно поступает 0,1-6 мкг ПХФ, в противоположность другим хлорорганическим соединениям не проявляет выраженного свойства к накоплению в жировой ткани. В силу этого период полувыведения составляет около 20 дней.

Древесина, пропитанная ПХФ все чаще становится предметом исследования при необходимости утилизации. Каждый год заменяют более миллиона деревянных столбов и конструкций, создавая потенциал для двух миллионов кубометров загрязненных отходов. Эти отходы оцениваются в концентрации ПХФ более 10 г/кг древесины. Большинство столбов используются повторно в качестве опор, либо выбрасываются на свалки, поэтому предпринимаются попытки классифицировать ПХФ-обработанную древесину в качестве опасных отходов. Реклассификация древесины приведет к тому, что объем материала быстро превысит имеющиеся возможности нормы, а традиционные методы утилизации, такие как сжигание или биоразрушение, являются либо слишком дорогостоящими, либо пока еще не доказали свою надежность, поэтому требуется экономически эффективный метод утилизации. Сверхкритические жидкости (СКЖ) предлагают альтернативу, в качестве технологических растворителей, для устранения загрязненных материалов и сокращения объема токсинов, которые должны быть уничтожены путем сжигания или химического окисления.

Предложены следующие механизмы сверхкритического извлечения химических веществ из твердых матриц [1,2]:

1. Одноступенчатый процесс растворения и удаления органических загрязнителей из твердой матрицы [3].

2. Двухэтапный процесс, включающий десорбцию загрязняющих веществ из твердой матрицы с последующим растворением [4].

3. Двухступенчатая экстракция, которая включает растворение и реакцию (в основном окисления) токсичных материалов, которые обычно трудно растворить [5,6].

Поэтому моделирование процесса должно основываться на типе взаимодействия экстракта с твердой матрицей. Предполагается, что извлечение ПХФ из древесины, пропитанной автоклавной пропитке, будет следовать механизму второго типа описанного выше.

### Методы и материалы

В качестве образцов были использованы сосновые бруски размером 10x10x100 мм. Образцы подвергались автоклавной пропитке раствором масла, содержащем 10% пентахлорфенола.

Для проведения исследований использовалась лабораторная экстракционная сверхкритическая установка с насосным циклом работы [7, 8], позволяющая проводить экстрагирование и измерение растворимостей твердых и жидких веществ в сверхкритическом диоксиде углерода при давлениях до 40 МПа в диапазоне температур 308-368 К (рис. 1). Основными узлами и системами установки являются система создания, регулирования и измерения давления, система регулирования и измерения температуры, экстрактор, система разделения растворяемого вещества и растворителя.

Система создания, регулирования и измерения давления состоит из жидкостного шприцевого насоса СФЭ-400 (3) с электронным блоком управления (ЭБУ) и образцового манометра (PI).

Диоксид углерода из баллона (1) через систему очистки (2) поступает в цилиндр жидкостного шприцевого насоса (3), обеспеченного контуром охлаждения. Система очистки состоит из двух ступеней: фильтра тонкой очистки, предназначенного для отделения механических примесей и фильтра-осушителя, заполненного цеолитом для отделения влаги, содержащейся в баллонах с CO<sub>2</sub>.

Охлаждение рабочего объема насоса осуществляется прокачиванием холодного теплоносителя через рубашку охлаждения, что обеспечивает жидкую фазу диоксида углерода в цилиндре. Теплоноситель охлаждается в термостате (4) холодильным агрегатом (5).

Температура в рубашке охлаждения измеряется хромель-алюмелевой термопарой (Т1), введенной непосредственно в исследуемую среду через уплотнение специальной конструкции.

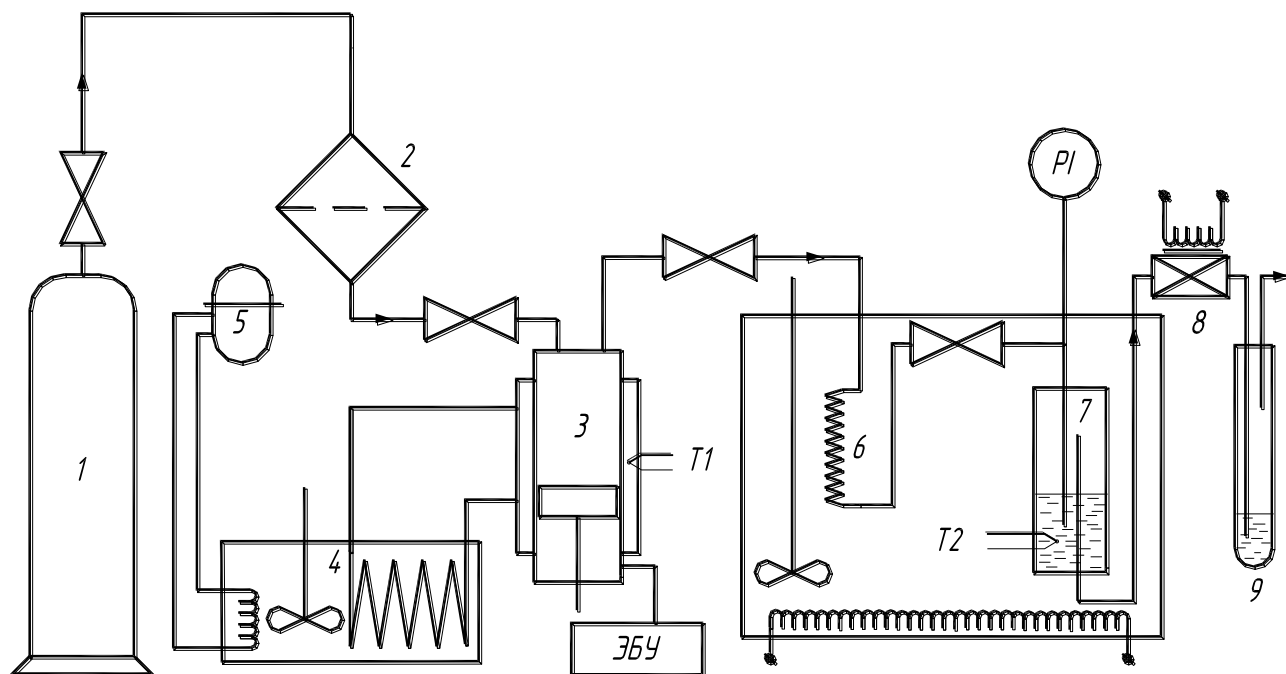


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для сверхкритической экстракции

Шприцевой насос, с рабочим объемом цилиндра  $150 \text{ см}^3$ , заполняли жидким диоксидом углерода из резервуара  $\text{CO}_2$  с погружной трубкой. Шприцевой насос за один цикл работы способен прокачать около 100 г жидкого диоксида углерода, поэтому измерение растворимости слаборастворимых веществ проводится за несколько циклов работы насоса. В процессе работы насоса постоянно контролируются давление, мгновенный расход, степень заполнения цилиндра жидкостью и объем прокачанной жидкости. Измерение давления в экстракторе производится образцовым манометром класса точности 0,2 с пределом измерений 0-40 МПа.

Диоксид углерода при заданном рабочем давлении перед поступлением в экстрактор подогревается до рабочей температуры в теплообменнике предварительного нагрева (6). Теплообменник предварительного нагрева и экстрактор (7) погружены в емкость термостата марки U-10. Температура флюида в экстракторе измеряется хромель-алюмелевой термопарой

(Т2), введенной непосредственно в исследуемую среду через корпус с использованием специального уплотнительного устройства. Точность измерения температуры оценивается в пределах  $\pm 0,05 \text{ К}$ . Градуировка всех использованных в установке термопар осуществлялась индивидуально с точностью  $\pm 0,03 \text{ К}$ .

Процесс растворения исследуемого вещества в сверхкритическом флюиде происходит в экстракторе, представляющим собой сосуд высокого давления объемом  $20 \text{ см}^3$ , рассчитанный на давления до 40 МПа при температурах до 363 К. Перед началом эксперимента производится загрузка предварительно взвешенных деревянных образцов. Заполнение экстрактора диоксидом углерода производили с расходом, не превышающим 0,01-0,05 мл/мин. Выходной поток барботировали через ацетоновую холодную ловушку (8) для захвата ПХФ из выходящего потока.

## Результаты

На основе проведенных экспериментальных исследований была выявлена зависимость эффективности извлечения пентахлорфенола от изменения таких показателей, как давление и температура (таблица 1).

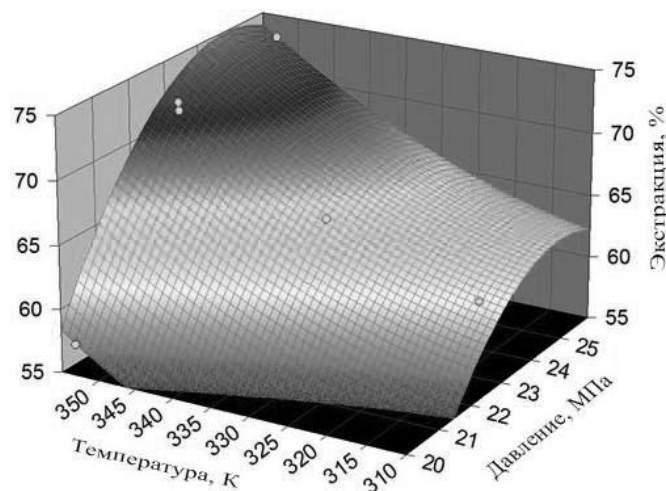
**Таблица 1** - Оценочные переменные модели и количество ПХФ, извлеченного при различных экспериментальных условиях

| Давление (МПа)      | Температура (К) | % Extracted |
|---------------------|-----------------|-------------|
| Перепад давления    |                 |             |
| 20                  | 353             | 57,5        |
| 23                  | 353             | 71,3        |
| 26                  | 353             | 73,2        |
| Перепад температуры |                 |             |
| 23                  | 313             | 61          |
| 23                  | 333             | 65          |
| 23                  | 353             | 72          |

Для проверки воспроизводимости результатов были выполнены по три эксперимента в каждом состоянии. Изменение варьировалось с температурой и давлением, но максимум составлял менее  $\pm 10\%$ .

Влияние давления (20-26 МПа) и температуры (от 313 до 353 К) определялось при постоянной скорости потока растворителя (2 см<sup>3</sup>/мин) с периодическим замером концентрации ПХФ в отходящем потоке. Скорость типичной динамической сверхкритической экстракции жидкости сперва протекает быстро, а затем замедляется. Экспериментальные данные показывают, что скорость экстракции увеличилась с увеличением давления и температуры растворителя. Экстракция образцов показала, что при увеличении давления растворителя с 20 до 26 МПа эффективность экстракции увеличилась с 57,5 до 73,2%. Эффективность экстракции с увеличением температуры растворителя с 313 до 353 К, увеличилась с 61 до 72% (таблица 1). Таким образом, процент извлечения ПХФ из древесных образцов

увеличивался с увеличением как давления, так и температуры (рис. 2).



**Рис. 2.** График влияния извлечения ПХФ от температуры и давления

На основании экспериментальных данных была воспроизведена регрессионная модель, которая показывает влияние выхода экстракта ( $\gamma$ ) от температуры ( $T$ ) и давления ( $P$ ):

$$\gamma = 12978,393 + 34,81667P - 0,7P^2 - 4684,9259 \ln T + 411,05791(\ln T)^2.$$

## Заключение

Цель данного исследования состояла в определении возможности извлечения пентахлорфенола из предварительно пропитанной древесины с использованием сверхкритического углекислого газа.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что скорость экстракции увеличилась с увеличением давления и температуры экстрагента, что происходило из-за увеличения комбинированного коэффициента массопередачи. Получена регрессионная модель зависимости процентного выхода ПХФ от режимных параметров экстрагента.

## Литература

1. Akgerman A., Irvin T.R. and Dexter J.B. Extraction of phenol from water with supercritical carbon dioxide, Journal of Supercritical Fluids, Volume 2, Issue 2-3, USA, 1989, pp. 51-56;

2. Eckert C. A., Van Alsten J. G. and Stoicos T. Supercritical fluid processing, USA, 1986, pp.319-325.

3. Ehntholt D. J., Thrun K. and Eppig C. The concentration of model organic compounds present in water at part-per-billion levels using supercritical fluid carbon dioxide, USA, 1983, pp. 219-220.

4. De Fillipi R. D. and Krukoni V. J., Supercritical Fluid Regeneration of Activated Carbon for Adsorption of Pesticides, US EPA, 1980, pp. 349-415.

5. Groves F. R Jr., Brady B. and Knopf F.C., State-of-the-art on the supercritical extraction of organics from hazardous wastws, USA, 1985, pp.237-274.

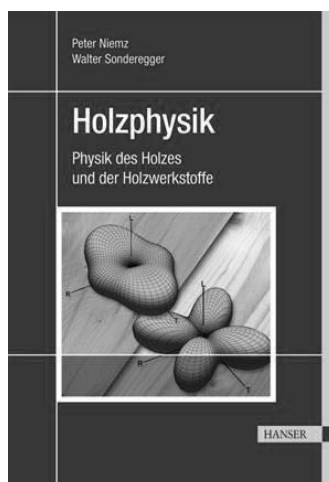
6. Modell M., US Patent 4,338,199 (1982).

7. Максудов Р. Н. Экспериментальная установка для проведения процессов сверхкритической флюидной экстракции с использованием жидкого соразтворителя / Р.Н. Максудов, А. Е. Новиков, Е. Н. Тремасов, Ф. М. Гумеров // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2004. – № 1-2. – С. 168-172.

8. Тремасов Е. Н. Экспериментальная установка для исследования растворимости биологически активных компонентов растительного сырья в сверхкритическом диоксиде углерода / Е. Н. Тремасов, А.Е.Новиков, Р. Н. Максудов // Тезисы научной сессии КГТУ. Казань. – 2002. – С. 122.

© **Е.Н. Тремасов** – к.т.н., помощник проректора по ЭИ, Ведущий инженер ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»; **А. Р. Мухтарова** - магистрант кафедры «Архитектура и дизайна изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»; **А.В. Сафина** - к.т.н., доцент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», alb\_saf@mail.ru; **Г.Ф. Илалова** - магистрант кафедры «Архитектура и дизайна изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

## Представляем новую книгу Питера Нимца и Вальтера Сондереггера!



Niemz P. Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe / P. Niemz, W. Sonderegger. – Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2017. – 580 p.  
print ISBN: 978-3-446-44526-0,  
eISBN: 978-3-446-44546-8

В книге содержатся базовые сведения о строении, свойствах и качестве древесины и древесных материалов, описание инновационных методик и результатов исследований, примеры практического использования древесины и древесных материалов. Отдельная глава книги посвящена ретроспективному обзору исследований в области физики древесины, истории формирования научно-исследовательских центров в области деревообработки в мире. Авторами детально описаны строение древесины и структура древесных материалов, физические, механические, технологические и эксплуатационные свойства древесины и древесных материалов, отражена взаимосвязь между структурой и свойствами, описано

влияние факторов на свойства древесины и древесных материалов. В нескольких главах авторы приводят результаты многолетних экспериментальных исследований механических свойств древесины и древесных материалов, выполненных под руководством профессора П. Нимца. Подробно изложены новейшие методики исследований, такие как синхротронная микротомография, нейтронная радиография и томография, наноиндентирование, спектрометрический анализ. В книге рассмотрены практические вопросы: разрушение и старение, напряжения и деформации древесины и материалов на ее основе, использование физических свойств древесины для онлайн-контроля качества, моделирование структуры и свойств древесных материалов. Также содержатся справочные данные показателей свойств древесины различных пород и древесных материалов, методик испытаний, нормативных документов.



Оптовые поставки гидрооборудования

[www.gidrosila.ru](http://www.gidrosila.ru)

ООО "ГидроСила"

Тел: +7 (495) 787-01-89

Моб: +7 (926) 354-53-82

E-mail: [gidrosila3@mail.ru](mailto:gidrosila3@mail.ru)



### **Запчасти для манипуляторов:**

**Loglift, Foresteri,  
Kesla, Jonsered,**

**Hiab, Epsilon,**

**СФ-65, ПЛ-70,**

**ПЛ-97, ЛВ-185, МУГ-70 и др.**

### **Запчасти для форвардеров, харвестеров:**

**John Deere, Valmet, Ponsse**



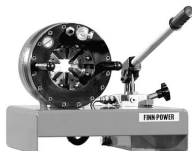
**Распределители  
Гидронасосы**



**Грейферы  
Ротаторы**



**Фильтры  
Гидроцилиндры**



**Обжимное  
оборудование  
РВД и фитинги**



*Навесы*



*Перила*

*Кованые решетки*



# *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*



*Качели*



*Ворота*



г. Казань, ул. А. Кутуя, д. 163 А

сайт: [www.rt-kovka.ru](http://www.rt-kovka.ru)

e-mail: [luxmetall@yandex.ru](mailto:luxmetall@yandex.ru)

тел.: (843)240-90-23

8-966-240-90-23

*Металлические двери*

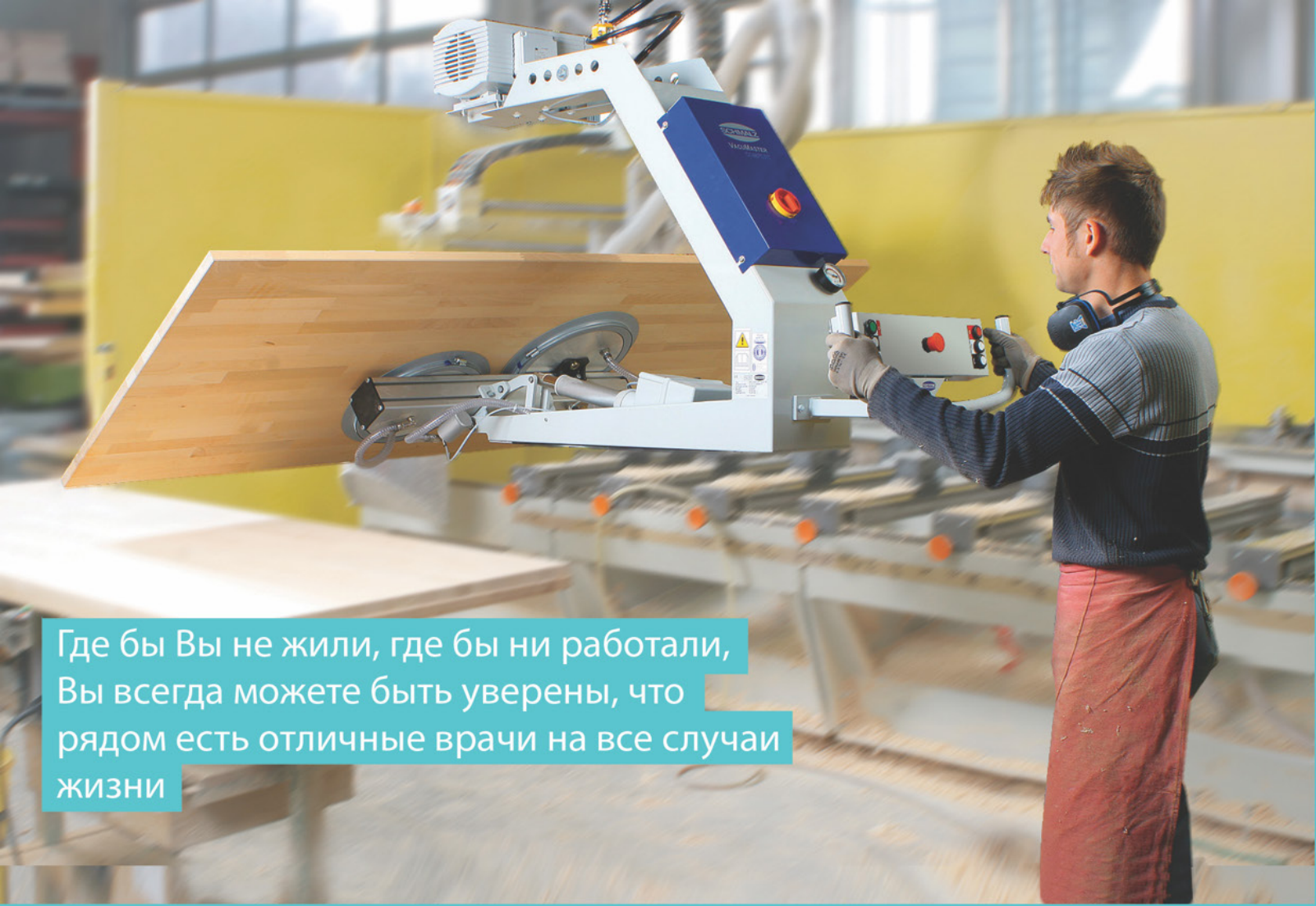


*Заборы*



*Входные группы*





Где бы Вы не жили, где бы ни работали,  
Вы всегда можете быть уверены, что  
рядом есть отличные врачи на все случаи  
жизни

# Здоров.і

Поиск врачей и клиник по всей России

<http://zdorov.li>