

Дерево —
1/2018 обрабатывающая
промышленность

обрабатывающая промышленность



Дерево —

ISSN 0011-9008

обрабатывающая промышленность

1/2018

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

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

Редакционная коллегия:



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

ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет»



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

ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет»

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dr. prof. Vlado Goglia
University of Zagreb, Croatia

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

Dr. prof. Nencho Delijski
University of Forestry, Bulgaria

Dr. prof. Ladislav Dzurenda
Technical University, Slovakia

Dr. prof. Etele Csanady
University of West Hungary

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

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

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

© «Редакция журнала
«Деревообрабатывающая
промышленность», 2018

journal_woodworking@mail.ru
www.dop1952.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Лесоинженерное дело

- Царев Е.М., Анисимов С.Е., Рукомойников К.П., Ахмадеев Д.И., Тюлькин Д.В.**
Повышение эффективности работы захватно-срезающего устройства на рубках ухода 3

- Кириченко В.М., Новоселов В.Г.**
О нагруженности и напряженном состоянии пильной рамки тарной лесопильной рамы 7

Физико-механические процессы в деревообработке

- Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б.**
К вопросу оценки сопротивления удару поверхностей лакокрасочных покрытий на древесине и древесных материалах 13

- Ермоченков М.Г., Кладов М.Ю.**
Тепловые эффекты удаления связанной влаги из древесины 20

- Заринов Ш.Г., Пунтусова Ю.С.**
Обоснование технологии осушения агента сушки методом конденсации 27

- Угаров П.А., Рыкунин С.Н., Суров В.П.**
Анализ параметров материалов для ограждающих конструкций малоэтажных домов 33

- Lukash A. A., Lukutsova N. P.**
Regularities of the formation of surface cracks in cylindrical logs 38

- Zoltán Kocsis, Etele Csanády**
Studies on the pelleting of wood based materials 42

- Адамия А.М.**
Механические свойства поризованного арболита, содержащего полистирольный гравий 50

Химическая технология древесины

- Сафина А.В., Сайфутдинов Д.М., Сафин Р.Г., Хайрутдинова А.Р., Валеев К.В., Асаева Л.Ш., Шайхутдинова Д.А.**
Обзор отечественных исследований в области получения биологически активных веществ из биомассы березы 56

- Исмагилова Л.М., Садртдинов А.Р., Тимербаев Н.Ф.**
Исследование процесса термохимической конверсии древесного сырья в диметиловый эфир 65

- Кашин Е.М., Диденко В.Н.**
Балансово-концентрационный метод определения состава и выхода древесного генераторного газа. Балансовая часть 73

- Сафина А.В., Сафин Р.Г., Хайрутдинова А.Р., Сайфутдинов Д.М., Валеев К.В., Асаева Л.Ш.**
Актуальное состояние отрасли комплексной переработки лиственницы 83

- Ананьева О.В., Нуртдинов Р.М., Понкратов А.С., Валеева Р.Т., Шулаев М.В.**
Сравнительная оценка эффективности процессов гидролиза целлюлозы минеральными кислотами 91

Лесоинженерное дело

УДК 631.6

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЗАХВАТНО-СРЕЗАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА РУБКАХ УХОДА

Е.М. Царев, С.Е. Анисимов, К.П. Рукомойников, Д.И. Ахмадеев, Д.В. Тюлькин

Для изучения эффективности использования оборудования авторами предложена конструкция захватно-срезающего устройства (ЗСУ) для рубок ухода, проведены фотохронометражные наблюдения, в результате которых установлены оперативное время работы ЗСУ и длительность приемов цикла по формированию пачки деревьев на серийно выпускаемого ЗСУ и предложенной конструкции ЗСУ. Для обеспечения экономической сопоставимости вариантов все расчеты произведены для деревьев с одинаковыми физическими характеристиками.

Ключевые слова: захватно-срезающее устройство, рубки ухода, лесозаготовительная машина, освещение, прочистка.

To study the efficiency of equipment use, the authors proposed the design of a clamping-cutting device (ZSU) for thinning cuttings, photo-timing observations were made, as a result of which the operating time of the ZSU and the duration of cycle techniques for forming a patch of trees on a commercially available ZSU and the proposed structure ZSU. To ensure economic comparability of the options, all calculations are made for trees with the same physical characteristics.

Key words: gripping-shearing device, cutting of care, logging machine, clarification, cleaning.

Введение

Экономика в лесном хозяйстве также необходима, как в любой другой отрасли, поэтому важно с наименьшими затратами вырастить высококачественную древесину, учитывая государственное лесное законодательство. Достижение высокой продуктивности насаждения может быть обеспечено при максимальном использовании древесным пологом солнечной энергии и достаточном корневом питании деревьев. Это достигается поддержанием оптимальной численности деревьев в определенном возрасте на единице площади благодаря применению соответствующей интенсивности изреживания. При этом необходимо удалять нежелательные деревья и из них производить товарную продукцию виде жердей и низкосортных балансов.

В настоящее время на рубках ухода в большинстве случаев широкое применение находят ручные моторизованные инструменты, на небольших лесокультурных площадях, где использование тракторных агрегатов невозможно, а иногда нецелесообразно. Однако, применение механизмов такого типа, из-за малой производительности не может обеспечить уход за молодняками в необходимых объемах[4].

Перспектива комплексной механизации работ в молодняках намечается путем внедрения машин[5, 10].

Параллельно с внедрением способа механизации на заготовках леса идет оценка и исследование производительности этих машин. Несмотря на все это механизированные технологии при вырубках спелого леса призывают к разрешению целого ряда вопросов, как быстрее и наиболее эффективнее обрабатывать вырубаемые деревья, как проще осуществлять передвижение в тяжелых условиях лесосек, то на рубках ухода добавляются существенные аспекты. Стоит отнести к ним такие требования, вследствие которых после рубки оставшимся для дальнейшего роста лесонасаждениям следует оставаться здоровыми и перспективными, без повреждений корневой системы и надземной части, что позволяет достигнуть оптимума целевого древостоя (Розинь 1978; Савельев 1989; Ovaskainen 2009) [4].

Для увеличения производительности машин на рубках ухода, особенно в молодняках, необходимо обеспечить их технологическим оборудованием, обеспечивающего обработку нескольких деревьев за один прием. В практике механизации работ на рубках ухода применяют техническое оснащение под видом захватно-

срезающих устройств с лесонакопителями [1, 2]. В тоже время данные накопители могут поместить количество древостоев в своих захватах не более 3. В связи с этим возникает необходимость разработки новых механизмов ЗСУ, обеспечивающих увеличение результативности труда за счет сокращения время цикла обработки группы древостоев.

Цель работы: Разработка конструкции захватно-срезающего устройства с лесонакопителем, что повышает производительность труда за счет сокращения время цикла обработки группы деревьев.

Решаемые задачи: Анализ существующих конструкций захватно-срезающих устройств (ЗСУ) лесозаготовительных машин. В целях выполнения рубок ухода за лесом используются разные конструкции ЗСУ [3, 6, 7]. На их основе были проведены литературные и патентные исследования по существующим конструкциям. В ходе проделанных исследований выявились их слабые стороны. Такие как: сложность и громоздкость этих устройств, так и низкая производительность.

Описание проекта: В целях разрешения поставленных задач предложена конструкция ЗСУ (рис. 1) [5, 8, 10], включающая в себя манипуляторную стрелу 1, расположенную на манипуляторной стойке 2, слева на конструкции

ЗСУ размещен основной захват 3 с зажимными рычагами 4, гидроцилиндр 5 приводит в движение захват и рычаги, и режущий орган, представленный пильным механизмом 6, а справа от стойки 2 располагается накопительный захват 7, исполненный из 4-х пластин 8 связанных друг с другом болтами 9, на этих пластинах в направляющих 10 размещены прижимные планки 11, они сопряжены, с одним из звеньев 12 цепной передачи 13, гидромотор 14 приводит в движение прижимные планки 11, наряду с этим снаружи боковых пластин 8 установлены узлы подшипников 15, с помощью них, вместе с гидроцилиндром 16 накопительный захват 7 объединен со стойкой 2 со способностью перемены положения в горизонтальной плоскости.

Устройство для срезания работает следующим способом. Конструкцию ЗСУ с разжатым основным захватом 3, вместе с разжатым накопительным захватом 7 нацеливают по отношению к выбранному дереву. Стойка 2 надвигается на выбранное дерево, вследствие оно окажется непосредственно в центре рабочего пространства. Следом включается гидроцилиндр 5, с помощью него основным захватом 3 зафиксировается выбранное дерево.

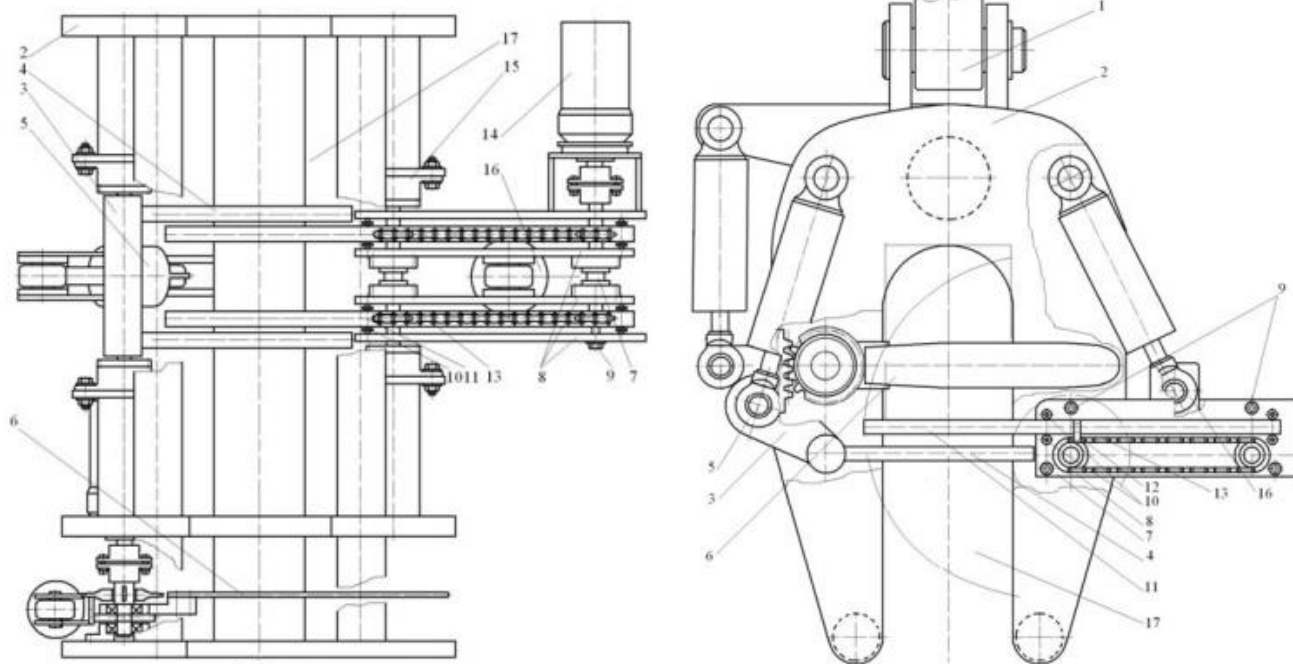


Рис. 1. Захватно-срезающее устройство ЛЗМ:

1-манипуляторная стрела, 2 - стойка, 3 – основной захват, 4 – зажимные рычаги, 5 - гидроцилиндр, 6-пильный механизм (пила), 7 – накопительный захват, 8 - пластины, 9 – болтовые соединения, 10 - направляющие, 11 – прижимные планки, 12 – звено цепной передачи, 13 – цепная передача, 14 - гидромотор, 15 – узлы подшипников, 16 - гидроцилиндр, 17-рабочее пространство

Далее пильный механизм 6 совершает спиливание выбранного дерева. Пила возвращается в свое первоначальное местоположение. Благодаря гидромотору 14 и цепной передаче 13 у накопительного захвата 7 выдвигаются прижимные планки 11, следом задействовав гидроцилиндр 16 осуществляется разворот прижимных планок относительно первого дерева, надежно закрепляя его в своем рабочем пространстве.

Следом раскрытый основной захват 3 и стойку 2 нацеливают по отношению ко второму дереву. Срезание закрепленного второго дерева осуществляют пильным механизмом 6, а пила возвращается в свое первоначальное местоположение. Благодаря гидромотору 14 и цепной передаче 13 у накопительного захвата 7 выдвигаются прижимные планки 11 (выводятся из промежутка между первыми вторым деревом), следом задействовав гидроцилиндр 16 осуществляется разворот в направлении второго дерева, прижимные планки устанавливаются с внешней стороны. Прижимные планки 11 выдвигаются при помощи гидромотора 14, а благодаря гидроцилиндру 16 после разворота происходит фиксация второго дерева. Основной захват снова раскрывается, ЗСУ можно использовать в целях срезания третьего дерева. Далее по аналогичной схеме ведется последующая обработка деревьев, пока рабочее пространство 17 внутри стойки не будет заполнено.

Как только рабочее пространство внутри стойки полностью заполнится деревьями, гидромотором 14 и цепной передачей 13 у накопительного захвата 7 задвигают прижимные планки 11 (выдвигают из промежутка между последними обработанными деревьями), следом гидроцилиндром 16 осуществляется разворот в сторону первого дерева, далее выдвигаются прижимные планки 11, они размещаются у первого дерева с наружной стороны. Стойка 2 с деревьями отводится к месту складирования, производится открытие основного захвата 3, с помощью разворота захвата-накопителя 7 в сторону рабочей зоны, накопленные обработанные деревья выталкиваются за пределы захватно-срезающего устройства.

Устройство для срезания деревьев предполагается устанавливать на колесную базовую машину небольшой массы, которая представлена на рис. 2 [2].



Рис. 2. Базовая лесозаготовительная машина

Определим производительность предлагаемой конструкции захватно-срезающего устройства. Для этого составим блок-схему работы лесозаготовительной машины с предлагаемой конструкцией захватно-срезающего устройства с лесонакопителем, представленную на рис. 3.

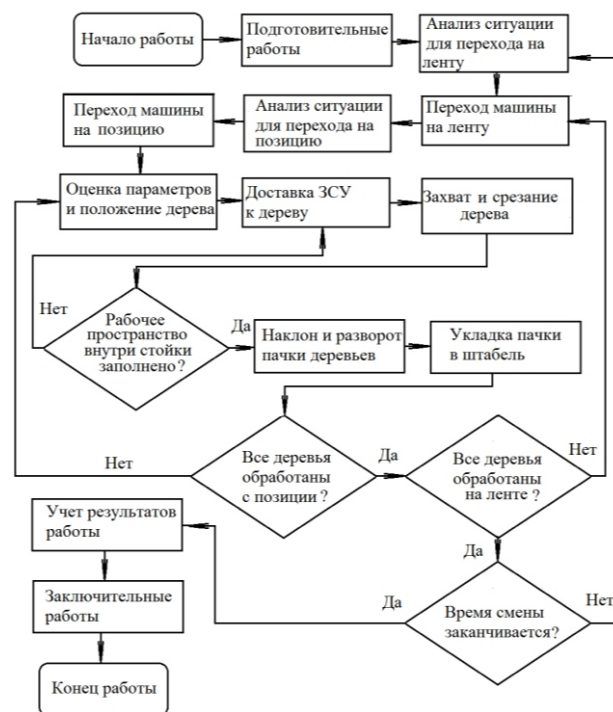


Рис. 3. Блок-схема работы лесозаготовительной машины

Циклограмма работы лесозаготовительной машины представлена на рис. 4.

T_z – время доставки захватно-срезающего устройства к дереву, принимаем равным 20 сек;

$T_{з.п.с}$ – время затрачиваемое на захват, подтягивание и срезание дерева, значение применяется равным 20 сек;

T_r – время затрачиваемое оператором для оценки наполненности рабочего пространства внутри стойки, т.к. это время незначительно, им можно пренебречь;

$T_{п.р}$ – время на наклон и разворот и наклон дерева (пачки деревьев), составляет 10 сек;

T_u – время затрачиваемое на укладку пачки деревьев в штабель, примем 5 сек.

$$T_{\Sigma} = T_z + T_{з.п.с} + T_{п.р} + T_u = 20 + 20 + 10 + 5 = 55 \text{ сек.}$$



Рис. 4. Циклограмма работы лесозаготовительной машины

Схема работы лесозаготовительной машины представлена на рис. 5.

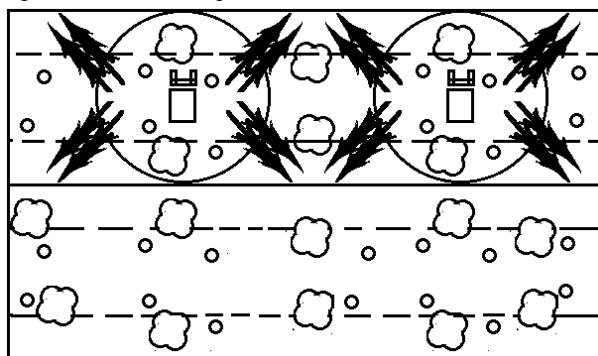


Рис. 5 Схема работы лесозаготовительной машины с накопителем

Исходя из выше сказанного, определим производительность лесозаготовительной машины на рубках ухода, а именно на осветлении и прочистке. $P_{\Sigma} = 2,2 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Таблица 1 - Сравнение производительности харвестера в лесонасаждениях разного породного состава

Группы	Средняя производительность, $\text{м}^3/\text{ч}$
Сосняк чистопородный	3,958
Ельник чистопородный	3,092
Листоветная смешанная	3,673

Наибольшая производительность харвестера при среднем вырубном дереве $0,1 \text{ м}^3$ в чистопородных сосняках – $3,96 \text{ м}^3/\text{ч}$, в

листоветных смешанных лесонасаждениях – $3,67 \text{ м}^3/\text{ч}$, в чистопородных ельниках – $3,09 \text{ м}^3/\text{ч}$ [9].

Таким образом, выполненные коллективом авторов научные исследования позволили осуществить комплексный анализ технических и технологических особенностей работы предложенной техники и технологии лесосечных работ, обосновать теоретическую производительность модернизированной машины на основе реальных производственных данных и возможности ее применения в различных природно-производственных условиях лесосек. Полученные результаты могут быть эффективно использованы при выполнении конструкторских и технологических работ в области лесной промышленности и дают отечественным и зарубежным производителям альтернативную возможность эффективного выбора техники и технологии ведения рубок леса.

Литература

1. <http://forwarder.ru/forestmachines/p5256.html>.
2. <http://www.brackeforest.com/parser.php?di=344:2553>.
3. А.С. № 692594 СССР, МПК Захватно-срезающее устройство лесозаготовительной машины [Текст] / Королев В.Е., Учкин Н.Д., заявитель и патентообладатель Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт механизации и энергетики лесной промышленности - 2612359, заявл. 10.05.1978, опублик.: 25.10.1979.
4. Атрохин, В. Г. Рубки ухода и промежуточное лесопользование /В. Г. Атрохин, И. К. Иевинь. – М.: Агропромиздат, 1985. – 252 с.
5. Ахмадеев Д.И., Гайнуллин Р.Х., Кренев А.В. Захватно-срезающее устройство лесозаготовительной машины для проведения рубок ухода за лесом Царев Е.М., Анисимов С.Е., Ахмадеев Д.И.В сборнике: XVI Международная научная конференция "Севергеоэкотех 2015" [текст]: материалы конференции (25-27 марта 2015). В 6 с.Ч2. – Ухта: УГТУ, 2015. - с. 140-142.
6. Зарубежные лесные машины [Электронный ресурс] : учебное пособие: самост. учеб.электрон. изд. / Б. П. Евдокимов, А. В. Андронов, Н. М. Тетерин ; Сыкт. лесн. ин-т. – Электрон.дан. – Сыктывкар: СЛИ, 2013. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>. – Загл. с экрана.

7. Пат. № 2 204 240 Российская Федерация, МПК A01G 23/08 Захватно-срезающее устройство лесозаготовительной машины [Текст] / Сарайкин В.Г., Воскобойников И.В., Еремеев Н.С., Королев В.Е., Баурин И.П., Наумов Ю.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Государственный научный центр лесопромышленного комплекса"(RU) - [2001134974/13](#), заявл. 26.12.2001, опублик.: 20.05.2003 Бюл. № 14.

8. Пат. № [2569031](#) Российская Федерация, МПК A01G 23/08 Захватно-срезающее устройство лесозаготовительной машины [Текст] / Царев Е.М., Анисимов С.Е., Ахмадеев Д.И.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический

университет(RU) - [2014123898/13](#), заявл. 10.06.2014 опублик.: [20.11.2015](#) Бюл. № [32](#).

9. Петерсонс Я. Исследование влияния состава насаждений на производительность харвестера при проведении рубок ухода / Я. Петерсонс, А. Дреска // Труды БГТУ. - Минск : БГТУ, 2014. - № 2 (166) 2014 год. - С. 42-44.. Лесопромышленный комплекс.

10. Царев Е.М., Анисимов С.Е., Ахмадеев Д.И. Захватно-срезающее устройство лесозаготовительной машины для проведения рубок ухода за лесом. В сборнике: Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России Материалы Всероссийской студенческой конференции: в 8 частях. 2015. С. 15-17.

© **Е.М. Царев** – д-р техн. наук, профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», **С.Е. Анисимов** – канд. техн. наук кафедры лесопромышленных и химических технологий ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», **К.П. Рукомойников** – д-р техн. наук, профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», **Д.И. Ахмадеев** - магистрант кафедры лесопромышленных и химических технологий ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», **Д.В. Тюлькин** - аспирант кафедры лесопромышленных и химических технологий ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

УДК 674.053: 621.933.6

О НАГРУЖЕННОСТИ И НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ПИЛЬНОЙ РАМКИ ТАРНОЙ ЛЕСОПИЛЬНОЙ РАМЫ

В.М.Кириченко, В.Г.Новоселов

Рассмотрена пильная рамка тарной лесопильной рамы как статически неопределимая рамная система. Составлены канонические уравнения и определены неизвестные: изгибающий момент и продольная сила. Вычислены изгибающие моменты и определены напряжения в характерных сечениях.

Ключевые слова: тарная лесопильная рама, пильная рамка, статически неопределимая система, изгибающий момент, сила, напряжение

The saw frame of a tare-sawing frame as statically indefinable frame system is considered. The initial equations are worked out and unknown are defined: the bending moment and longitudinal force. The bending moments are calculated and tension in characteristic sections is determined.

Keywords: a tare-sawing frame, a saw frame, statically indefinable system, the bending moment, force, tension.

Введение

Тарные лесопильные рамы [1] применяются при производстве тонких (тарных) досочек и имеют в качестве рабочего органа пильную рамку (ПР), несущую комплект (постав) до 18 пильных полотен [2] и совершающую возвратно-поступательное или

плоское движение. Натяжение пильных полотен необходимо для придания им высокой жесткости, необходимой для сохранения устойчивости при работе, обеспечивающей надлежащее качество получаемых досочек. Сила натяжения каждого из пильных полотен может достигать десятков килоньютон, кроме этого, струбины, фиксирующие постав,

создают горизонтальное давление на стойки. Все это вызывает значительные деформации деталей пыльной рамки и обуславливает их напряженность [3]. Во время работы на эти статические нагрузки накладываются динамические составляющие: силы резания древесины и силы инерции масс деталей, усиливая их напряженно-деформированное состояние, однако доминирующими остаются силы натяжения пил, определяющие несущую способность конструкции [4]. Для расчетной оценки напряженно-деформированного состояния ПР необходимо знать величины продольных, поперечных сил и изгибающих моментов в характерных поперечных сечениях ее деталей.

Цель работы: Определение расчетных значений внутренних силовых факторов и напряжений в элементах пильной рамки тарной лесопильной рамы.

Основная часть

Пильная рамка тарной двух-шатунной лесопильной рамы РТ-40 (рис. 1) представляет собой рамную конструкцию, состоящую из верхней (I) и нижней (II) поперечин и стоек (III). Каждая поперечина выполнена из двух боковин - пластин прямоугольного сечения, скрепленных между собой болтами.

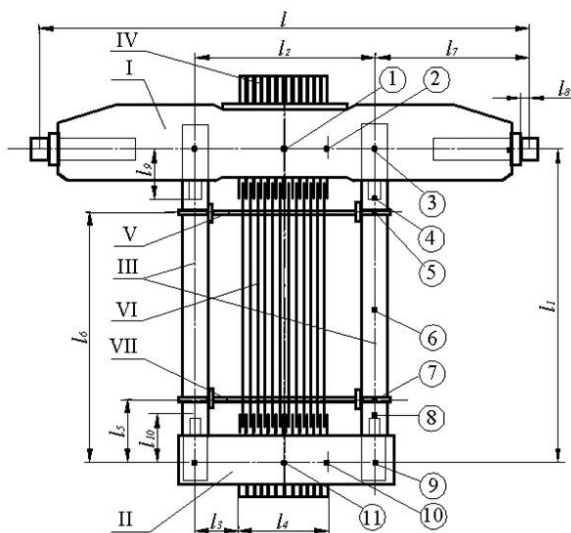


Рис. 1. Пильная рамка

Боковины присоединены к цапфам стоек цилиндрическими пальцами, а цапфы зафиксированы в стойках коническими штифтами. В концевых сечениях верхней поперечины приклепаны цапфы для

присоединения к ней шатунов кривошипно-шатунного механизма.

Между поперечинами с помощью захватов (IV) устанавливаются и натягиваются пильные полотна (V). Постав фиксируется по ширине и горизонтальному положению в ПР с помощью струбцин (VI).

Методы исследования

В соответствии с рекомендациями [5,6], представим расчетную схему пильной рамной лесопильной рамы в виде одноконтурной статически неопределимой рамной конструкции (рис. 2 а). При произвольной внешней нагрузке реакции опор R_A , H_A , R_B могут быть определены из трех уравнений равновесия статики, и система является внешне статически определимой. Степень внутренней статической неопределимости рамы

$$CH=3K, \quad (1)$$

где K - число замкнутых контуров.

Для ПР, состоящей из одного замкнутого контура (С D E F), $CH=3$. Это число равно количеству неизвестных внутренних силовых факторов, которые не могут быть определены из уравнений равновесия статики.

Основываясь на известных подходах Мора-Верецагина [7,8], разрежем верхнюю поперечину ПР по середине ее длины (рис. 2 б). В сечении, в общем случае, возникнет три неизвестных внутренних силовых фактора: изгибающий момент (x_1), продольная (x_2) и поперечная (x_3) силы.

Ввиду симметричности пыльной рамки и прикладываемых к ней нагрузок поперечные силы x_3 на месте разрыва отсутствуют, следовательно, одним неизвестным можно пренебречь и считать систему дважды статически неопределимой. Система уравнений неразрывности деформаций для задачи дважды статически неопределимой, согласно линейной связи между нагрузкой и деформацией и принципа независимости действия сил, будет следующей:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11} x_1 + \delta_{12} x_2 + \Delta_{1q} &= 0 \\ \delta_{21} x_1 + \delta_{22} x_2 + \Delta_{2q} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где x_1 и x_2 – искомые силовые факторы;

δ_{11} и δ_{22} – единичные перемещения от действия «лишних связей», равных

безразмерной единице, называются главными, и они всегда положительны;

Δ_{1q} и Δ_{2q} – перемещения от заданной нагрузки, называются свободными или грузовыми.

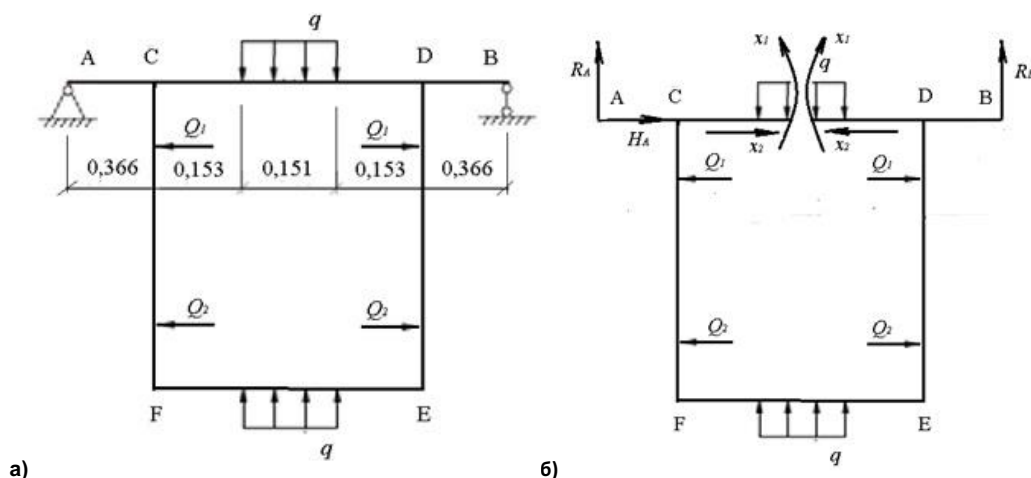


Рис. 2. Исходная (а) и расчетная (б) схемы ПР

Перемещения в системе уравнений имеют два индекса. Первый индекс указывает направление перемещения, а второй – силу, вызывающую это перемещение.

Для упрощения расчетов представим перемещения от внешних нагрузок в виде сумм:

$$\Delta_{1q} = \delta_{1q} + \delta_{1Q_1} + \delta_{1Q_2} \quad (3)$$

$$\Delta_{2q} = \delta_{2q} + \delta_{2Q_1} + \delta_{2Q_2} \quad (4)$$

где q – распределенная нагрузка от натяжения пил, а Q_1 и Q_2 – усилие распора соответственно верхних и нижних струбцин.

Пильная рамка имеет прямолинейные участки с постоянной жесткостью, вычисление интеграла Мора можно выполнить с помощью формулы Верещагина. Определяем величины перемещений в канонических уравнениях:

$$\delta_{11} = \frac{2l_1}{Z_1} + l_2 \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right); \quad (5)$$

$$\delta_{22} = \frac{2l_1^3}{3Z_1} + \frac{l_1^2 l_2}{Z_3}; \quad (6)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = - \left(\frac{l_1^2}{Z_1} + \frac{l_1 l_2}{Z_3} \right); \quad (7)$$

$$\delta_{1q} = - \left(\frac{ql_4^3}{24} + \frac{ql_2 l_3 l_4}{4} \right) \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) - \frac{ql_1 l_4 (4l_3 + l_4)}{4Z_1}; \quad (8)$$

$$\delta_{1Q_1} = \frac{Ql_6^2}{Z_1} + \frac{Ql_2 l_6}{Z_3}; \quad (9)$$

$$\delta_{2q} = \frac{ql_1^2 l_4 (4l_3 + l_4)}{8Z_1} + \frac{ql_1 l_2 l_3 l_4}{4Z_3} + \frac{ql_1 l_4^3}{24Z_3}; \quad (10)$$

$$\delta_{1Q_2} = \frac{Ql_5^2}{Z_1} + \frac{Ql_2 l_5}{Z_3}; \quad (11)$$

$$\delta_{2Q_1} = - \frac{Ql_6^2 (3l_1 - l_6)}{3Z_1} - \frac{Ql_1 l_2 l_6}{Z_3}; \quad (12)$$

$$\delta_{2Q_2} = - \frac{Ql_5^2 (3l_1 - l_5)}{3Z_1} - \frac{Ql_1 l_2 l_5}{Z_3}; \quad (13)$$

где $l_1 \dots l_6$ – размеры, указанные на рис. 1; Z_1, Z_2, Z_3 – коэффициенты жесткости соответственно стойки, верхней и нижней поперечин.

$$Z_i = \frac{EJ_i}{EJ_1}, \quad (14)$$

где E – модуль продольной упругости; J_i – момент инерции площади поперечного сечения соответствующего элемента.

Результаты исследования

Вычисления, произведенные при следующих исходных данных: Модуль продольной упругости, $E = 2 \times 10^8 \text{ кПа}$; размеры сечения трубы стойки ПР: $d = 0,057 \text{ м}$, $d_0 = 0,039 \text{ м}$; размеры сечения верхней и нижней поперечин ПР в точках 1, 11 (рис. 1) $b = 0,0225 \text{ м}$; $h_2 = 0,18 \text{ м}$; $h_3 = 0,12 \text{ м}$; распределённая нагрузка поперечин от натяжения с усилием 12 кН 18 пил $q = 1430 \text{ кН/м}$; усилие от распора струбцин $Q_1 = Q_2 = 30 \text{ кН}$, дали следующие значения:

– коэффициенты жесткости: $Z_1 = 1$; $Z_2 = 54$; $Z_3 = 16$;

– величины перемещений в канонических уравнениях: $\delta_{11} = 1,59 \text{ м}$; $\delta_{22} = 0,33 \text{ м}$; $\delta_{12} = \delta_{21} = -0,61 \text{ м}$; $\Delta_{1q} = -20,03 \text{ м}$; $\Delta_{2q} = 5,19 \text{ м}$;

– значения единичных сил: $x_1 = 22,57 \text{ кНм}$; $x_2 = 25,99 \text{ кН}$.

Изгибающие моменты в указанных на рис. 1 сечениях с учетом внутренних силовых факторов x_1 и x_2 определяются по формулам:

$$M_1 = x_1; \quad (15)$$

$$M_2 = x_1 - \frac{ql_4^2}{8}; \quad (16)$$

$$M_3 = x_1 - \frac{ql_4(4l_3 + l_4)}{8}; \quad (17)$$

$$M_4 = M_3 - x_2 l_9; \quad (18)$$

$$M_5 = M_3 - x_2(l_1 - l_6); \quad (19)$$

$$M_6 = M_3 - x_2 \frac{l_1}{2} + Q \frac{(2l_6 - l_1)}{2}; \quad (20)$$

$$M_7 = M_3 - x_2(l_1 - l_5) + Q(l_6 - l_5); \quad (21)$$

$$M_8 = M_3 - x_2(l_1 - l_{10}) + Q(l_6 + l_5 - 2l_{10}); \quad (22)$$

$$M_9 = M_3 - x_2 l_1 + Q(l_6 + l_5); \quad (23)$$

$$M_{10} = M_9 + \frac{ql_3 l_4}{2}; \quad (24)$$

$$M_{11} = M_9 + \frac{ql_4}{4}(l_4 + 2l_3) - \frac{ql_4^2}{8}. \quad (25)$$

По результатам вычислений на рис. 3 построены эпюры изгибающих моментов в поперечных сечениях элементов пильной рамки.

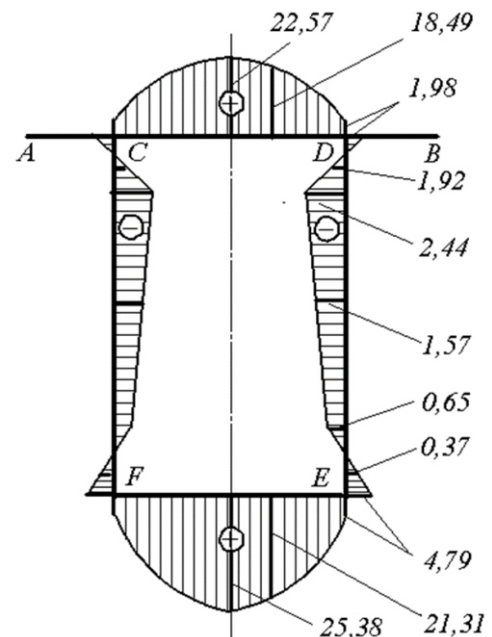


Рис. 3. Эпюра изгибающих моментов, кНм

Как видно, наиболее нагруженными являются сечения поперечин по оси симметрии ПР, причем у нижней поперечины максимальное значение изгибающего момента выше, чем у верхней. Нагруженность стоек носит существенно неравномерный характер со сменой направления изгибающего момента, принимающего максимальное значение в месте сочленения стоек с нижней поперечиной. Повышенная нагруженность нижней поперечины и стоек вблизи нее может быть объяснена ее меньшей жесткостью по сравнению с верхней поперечиной.

С учетом полученных значений изгибающих моментов M_i и действующих продольных сил N_i определены величины нормальных напряжений в характерных сечениях как для случая сложного напряженного состояния по общей формуле

$$\sigma = \pm \frac{M_i}{W_i} + \frac{N_i}{S_i}, \quad (26)$$

где M_i – изгибающий момент в сечении i («+» – на поверхности деталей внутри контура ПР, «-» – снаружи); W_i – момент сопротивления изгибу в сечении i ; N_i – продольная сила; S_i – площадь соответствующего поперечного сечения.

Величины продольных сил:

$$N_1 \dots N_3 = x_2; N_4 \dots N_8 = -ql_4/2; N_9 \dots N_{11} = 2Q - x_2.$$

Результаты расчетов представлены эпюрами напряжений на рис. 4.

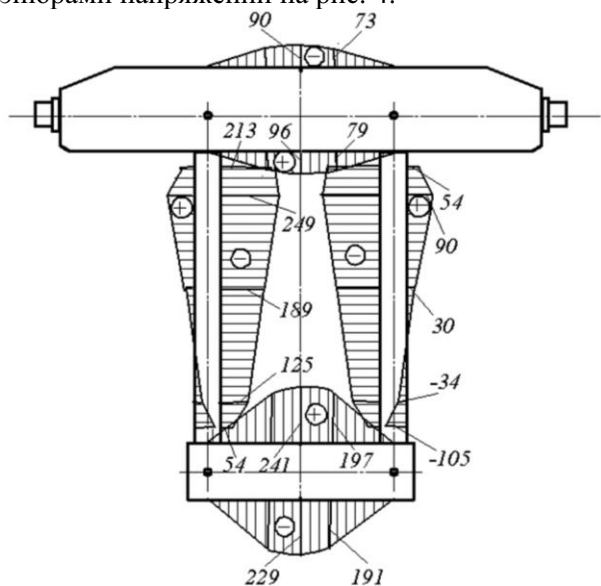


Рис. 4. Эпюры напряжений в деталях пильной рамки, МПа

Как видно, наиболее напряженной является нижняя поперечина ПР, причем в растянутых поясах напряжения по абсолютной величине превосходят напряжения сжатия в тех же сечениях. Напряжения в верхней поперечине существенно меньше, чем в нижней. Стойки испытывают сжатие с изгибом, причем по внутреннему контуру суммарные напряжения не меняют своего знака, в то время как на наружном контуре верхняя часть стойки испытывает растяжение, а нижняя – сжатие. В целом же стойки менее напряжены, чем нижняя поперечина. Сравнение полученных данных с экспериментальными значениями [9] показывает их некоторое превышение (до 30 %), которое при проектировочных расчетах идет в запас прочности.

Заключение

Составлены расчетная схема и математические выражения для определения

нагруженности элементов пильной рамки как статически неопределимой рамной конструкции. Определены величины изгибающих моментов в характерных сечениях и их максимальные значения. Вычислены напряжения в элементах ПР. Полученные данные могут быть использованы для прочностных расчетов при модернизации пильной рамки [10].

Литература

1. Рама лесопильная тарная модели РТ-40. Руководство по эксплуатации. – Главдревстанкопром, Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности СССР, 1987. – 129 с.
2. ГОСТ 10482-74 Пилы для тарных лесопильных рам. Технические условия. С изменениями №1 и 2. М.: Издательство стандартов, 1976. – 13 с.
3. Кириченко В.М. Деформации элементов пильной рамки тарной лесопильной рамы/ В.М. Кириченко, Л.А. Шабалин// Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды VII Международного Евразийского симпозиума / [под научной ред. В.Г. Новоселова]. – Екатеринбург, УГЛТУ, 2012. – С. 254–257.
4. Исследование силовых энергетических параметров и напряженно-деформированного состояния элементов механизма резания опытной лесопильной рамы РТ-40: отчет о НИР (промежуточный)/ Шабалин Л.А. – Свердловск: Уральский ордена трудового красного знамени лесотехнический институт им. Ленинского комсомола, 1986. – 343 с.
5. Шабалин Л.А. Динамическая нагруженность и напряженное состояние механизма резания лесопильных рам: Дис. ... канд.техн.наук: 05.21.01 – Свердловск, 1973. – 258с.
6. Виноградов В.Ф. Исследование и разработка рекомендаций по повышению несущей способности деталей пильных рамок одноэтажных лесопильных рам: Дис. ... канд.техн.наук: 05.06.02-Л., 1983. – 293 с.
7. Любошиц М.И. Справочник по сопротивлению материалов / М.И. Любошиц, Г.М. Ицкович. Изд. 2-е, исправл. и доп. – Минск: Вышейш. Школа, 1969. – 464 с.
8. Анохин Н. Н. Строительная механика в примерах и задачах: учеб. пособие для студентов вузов. Ч. II. Статически

неопределимые системы. - М.: Изд-во АСВ, 2000. - 464с.

9. Кириченко В.М. Повышение надежности пильной рамки тарной лесопильной рамы/В.М. Кириченко, Л.А. Шабалин // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной науч.-

техн. конференции. – Вологда: Изд-во ВоГТУ, 2012. С.73-76.

10. Шабалин Л.А., Кириченко В.М., Польшинский В.В. Совершенствование конструкции пильной рамки / Л.А. Шабалин, В.М. Кириченко, В.В. Польшинский.// Деревообрабатывающая промышленность.- 1988.- № 8.- с.4-5.

©В. М. Кириченко - аспирант ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», e-mail: kvmek@mail.ru; В.Г. Новоселов - канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой инновационных технологий и оборудования деревообработки, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», e-mail: kozerog54@yandex.ru.

Уважаемые авторы журнала!!!

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

Статьи, представляющие результаты исследований, должны включать разделы: «**Введение**», «**Методы и материалы**», «**Результаты**», «**Заключение**», «**Литература**».

Обзорные статьи также должны быть структурированы и состоять из разделов: «**Введение**», «**Обзор исследований в области...**», «**Заключение**», «**Литература**».

Рабочие языки журнала — русский и английский.

Макет журнала двухколоночный.

Параметры страницы:

верх — 3 см;

низ — 2,5 см;

левое поле — 1,8 см;

правое поле — 1,8 см;

расстояние между колонками — 1,25 см.

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

Размер рисунков:

ширина — не более 17,5 см;

высота — не более 12 см;

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

Размер таблицы не должен превышать 17,5 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»).

Физико-механические процессы в деревообработке

УДК 674.04(076.5)

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ УДАРУ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДРЕВЕСИНЕ И ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛАХ

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

Прочностные свойства покрытий характеризуют несколькими показателями. Одним из них является сопротивление разрушению при воздействиях на поверхность покрытия ударных нагрузок. Этот показатель называется ударной вязкостью или ударной прочностью. В большинстве случаев при ударных испытаниях определяют энергию, необходимую для разрушения поверхности покрытия образца в заданных условиях. В практике эксплуатации встречаются условия, при которых отдельные предметы обихода могут ударять различные плоскости деталей и узлов изделия при падении с некоторой высоты. Такой вариант ударной нагрузки воспроизводит метод испытания покрытий падающим грузом. Метод представлен в межгосударственном стандарте ГОСТ ISO 4211-4 2012, а также в отечественных стандартах ГОСТ 27736-88 и ГОСТ 4765-73. Сущность методов заключается в том, что стальной цилиндрический груз падает с известной высоты на стальной шар-бойк известного диаметра, помещенный на поверхность контролируемого образца. Оценка разрушения поверхности лакокрасочного покрытия производится в баллах и является качественной. Она не отражает многие характерные особенности, относящиеся как к возникающей ударной нагрузке, так и к возможностям лакокрасочных покрытий сопротивляться этому разрушению. В основе данной работы рассматривается вариант неупругого удара поверхности лакокрасочного покрытия. Определяется энергия на деформирование поверхности покрытия шарообразным телом. Определен диапазон скоростей падения груза, при котором возможно разрушение контролируемой поверхности. При известной энергии деформации поверхности покрытия появляется возможность оценки разрушения количественными характеристиками. Высота падения груза и возникающая при ударе величина деформации покрытия дает возможность рассчитать динамический коэффициент, позволяющий скорректировать значения статических напряжений. Полученные таким образом динамические напряжения позволяют оценить прочность покрытий при различных вариантах удара. Построенные номограммы отражают граничные условия, возникающие при ударе, в процессе стандартных испытаний и позволяют сравнить количественные показатели этих испытаний с возможностями лакокрасочных покрытий. Рассмотрение количественной оценки ударного воздействия на испытываемую поверхность лакокрасочного покрытия и сравнение энергии разрушения падающего груза с энергией сопротивления полимерных покрытий дает в дальнейшем данные для объективного пересмотра стандартных методов оценки сопротивления удару поверхностей лакокрасочных покрытий.

Ключевые слова: лакокрасочные покрытия, сопротивление удару

Strength properties of coatings are characterized by several parameters. One of them is the resistance to destruction when exposed to the surface of the coating shock loads. This indicator is called impact toughness or impact strength. In most cases, in shock tests determine the energy required to destroy the surface of the sample coating under specified conditions. In the practice of operation, there are conditions under which individual household items can hit different planes of parts and components of the product when falling from a certain height. This option reproduces impact loads test method of coatings by falling cargo. The method is presented in the interstate standard GOST ISO 4211-4 2012, as well as in domestic standards GOST 27736-88 and GOST 4765-73. The essence of the methods is that the steel cylindrical load falls from a known height onto a steel ball-flank of a known diameter placed on the surface of the controlled sample. Assessment of the destruction of the paint coating surface is made in points and is of high quality. It does not reflect many of the characteristics relating to both the resulting impact load and the ability of paint coatings to resist this destruction. At the heart of this work the variant of inelastic blow of a surface of a paint and varnish covering is considered. The energy for deformation of the coating surface by a spherical body is determined. The range of cargo drop speeds is determined, at which the destruction of the controlled surface is possible.

With the known deformation energy of the coating surface, it is possible to estimate the destruction by quantitative characteristics. The drop height of the load and the value of the deformation of the coating arising at impact makes it possible to calculate the dynamic factor that allows you to adjust the values of static stresses. The thus obtained dynamic voltage allow to evaluate the durability of coatings with different variants of the blow. Constructed nomograms reflect the boundary conditions arising from the shock, in the process of standardized tests and allow us to compare the quantitative performance of these tests with the possibilities of paint coatings. Consideration of quantitative assessment of impact on the tested surface of the paint and varnish coating and comparison of the breaking energy of the incident load with the resistance energy of polymer coatings gives further data for an objective revision of the standard methods for assessing the impact resistance of paint surfaces.

Keywords: paint coatings, impact resistance.

При эксплуатации полимерных лакокрасочных покрытий на изделиях из древесины и древесных материалов их разрушение происходит в самых разнообразных условиях. Поэтому прочностные свойства покрытий характеризуют несколькими показателями, определяемыми при различных условиях деформирования. Одним из таких показателей является сопротивление разрушению при ударных воздействиях нагрузки со скоростью 2 – 4 м/с [1]. Этот показатель называется ударной вязкостью или ударной прочностью.

В большинстве случаев при ударных испытаниях определяют энергию, необходимую для разрушения образца в заданных условиях. Одним из методов является испытание на Изоду [2]. Для этого используется прибор маятникового типа. С помощью него удар наносится по незакрепленному концу образца с надрезом покрытия. Отличием испытания по методу Шарпи является закрепление образца на концах и нанесение удара с помощью маятника по средней части образца с надрезом покрытия [2]. Такие методы (по Изоду, Шарпи) испытания на ударную вязкость не отражают особенности механического воздействия на поверхность лакокрасочных покрытий изделий из древесины и древесных материалов при их длительной эксплуатации. В быту встречаются условия, при которых отдельные предметы обихода могут ударять различные плоскости деталей и узлов изделия при падении с некоторой высоты. Такой вариант ударной нагрузки воспроизводит метод испытания покрытий падающим грузом. Метод представлен в межгосударственном стандарте ГОСТ ISO 4211-4 2012, а также в отечественном стандарте ГОСТ 27736-88. В этих стандартах испытания защитно-декоративных покрытий производят подготовленными на древесине и древесных материалах. Кроме этого в отдельной практике лакокрасочные покрытия

могут быть подготовлены на других материалах. Определение прочности при ударе для них осуществляют по ГОСТ 4765-73. В данной работе проводилось сравнение условий испытания покрытий сопротивления удару по перечисленным стандартам.

За основу сравнения был взят стандарт 2012 г., в котором покрытия представляются на образцах или деталях мебели из древесины и древесных материалов. Испытания по ГОСТ ISO 4211-4 2012, проводится на щитовых деталях имеющих вид законченной поверхности с лакокрасочным покрытием идентичный деталям мебели после окончательной обработки. Сущность метода заключается в том, что стальной цилиндрический груз падает с известной высоты внутри направляющего приспособления на стальной шар известного диаметра и твердости, помещенный на поверхность контролируемого образца. Степень повреждения контролируемого участка оценивается в баллах.

Оценка разрушения поверхности лакокрасочного покрытия при ударной нагрузке является качественной. Она не отражает многие характерные особенности, относящиеся как к возникающей ударной нагрузке, так и к возможностям лакокрасочных покрытий сопротивляться этому разрушению.

Целью данной работы являлось рассмотрение количественной оценки ударного воздействия на испытываемую поверхность лакокрасочного покрытия и сравнение энергии разрушения падающего груза с энергией сопротивления удару поверхностей лакокрасочных покрытий.

Материалы и методы

Оценке сопротивления удару подлежат по возможности плоские образцы с лакокрасочным покрытием в законченном виде отделки, предпочтительно с размерами не менее 120×140 мм. При испытании горизонтальных

поверхностей готовой мебели или частей мебели, испытуемое изделие должно находиться на твердом полу. На готовой мебели воздействие должно быть оказано на самую неподвижно закрепленную часть.

В качестве испытательного устройства по ГОСТ ISO 4211-4 2012 используется вертикально установленная направляющая труба цилиндрической формы с внутренним диаметром (40 ± 5) мм. На торцевой поверхности трубы закреплен диск толщиной $(10 \pm 0,5)$ мм. В центре диска имеется отверстие диаметром 14 мм для размещения в нем стального шара того же диаметра, представляющего собой роликовый подшипник с твердостью материала по Роквеллу 60-66 HRC. Цилиндрический груз массой (500 ± 5) г и диаметром приблизительно на 1 мм меньше, чем внутренний диаметр направляющей трубы, при испытаниях падает на стальной шар с высоты 10; 25; 50; 100; 200 и 400 мм. В качестве материала груза используется мягкий сплав, чтобы не деформировать шар при испытаниях.

Под описанное устройство для испытаний подходят устройства У-1, У-2 и У-2М [3] используемые для испытаний покрытий по ГОСТ 4765-73. Отличием является диаметры шарика-бойка 8 и 14 мм, масса грузов 500, 1000 и 1500 г. Высота падения грузов предусмотрена от 10 см с интервалом $5 \div 10$ см, пока не обнаруживаются повреждения лакокрасочного покрытия. В работе наибольшая высота падения груза из конструктивных соображений была выбрана 1000 мм.

ГОСТ 27736-88 предусматривает использование подобного устройства. Стальной шарик диаметром 40 мм и массой 263 г является одновременно грузом и шариком-бойком. Высота падения шарика от 250 до 2000 мм. Для расчетов наибольшая высота падения была выбрана 1000 мм.

В качестве испытуемого материала рассматривается защитно-декоративное покрытие полимерного типа.

Результаты и обсуждения

Рассмотрим метод определения оценки сопротивления удару поверхности лакокрасочных покрытий с точки зрения закона сохранения и превращения энергии в замкнутой системе. Падающий груз, шарик, образец, подставка и другие элементы испытательного приспособления отнесем к диссипативной системе тел, в которой механическая энергия

падающего груза преобразуется в другие формы энергии. В частности на поверхности образца происходит вдавливание шара, приводящее к деформации покрытия с образованием лунки. То есть происходит так называемый неупругий удар тел. На деформацию покрытия затрачивается работа, которая равна убыли полной механической энергии системы.

Так как удар неупругий, то скорости падающего груза, шарика, образца и подставки после удара одинаковы и равны v . Ввиду массивности образца и подставки и кратковременности удара, влиянием реакции подставки в процессе удара можно пренебречь, т.е. считать систему падающий груз, образец, подставка изолированной. Поэтому для нахождения скорости v можно воспользоваться законом сохранения импульса [4] в следующем виде

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2) \cdot v, \quad (1)$$

где m_1 – масса падающего груза, кг;

m_2 – суммарная масса образца и подставки,

кг;

v_1 – скорость падающего груза в момент удара, м/с;

v_2 – скорость образца и подставки до удара, м/с.

До удара образец и подставка неподвижны, то $v_2 = 0$. Скорости v_1 и v направлены одинаково. Из (1) скорость v может быть определена по следующей формуле

$$v = \frac{m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2}. \quad (2)$$

Кинетическая энергия падающего груза (W_k) расходуется на энергию сотрясения образца и подставки (ΔW), а также на деформирование поверхности лакокрасочного покрытия (A). Отсюда

$$A = W_k - \Delta W. \quad (3)$$

Кинетическая энергия падающего груза определяется по формуле

$$W_k = \frac{m_1 \cdot v_1^2}{2}. \quad (4)$$

Энергию сотрясения образца и подставки можно определить, зная скорость v из следующего выражения

$$\Delta W = \frac{(m_1 + m_2) \cdot v^2}{2}. \quad (5)$$

После подстановки v из (2) можно записать

$$\Delta W = \frac{m_1^2 \cdot v^2}{2(m_1 + m_2)}. \quad (6)$$

Учитывая выражения (3), (4) и (6) энергию деформирования поверхности покрытия можно определить как

$$A = \frac{m_1 \cdot m_2 \cdot v_1^2}{2(m_1 + m_2)}. \quad (7)$$

На рис. 1 приведены графики изменения энергии разрушения поверхности образцов, от скорости падения груза. В основу расчетов положены данные перечисленных стандартов, а также выражение (7). Масса груза (m_1) выбиралась согласно указанной в перечисленных стандартах, суммарная масса образца и подставки (m_2) соответствовала 5,18 кг и была вычислена с учетом конструкции устройств, приведенных в [3].

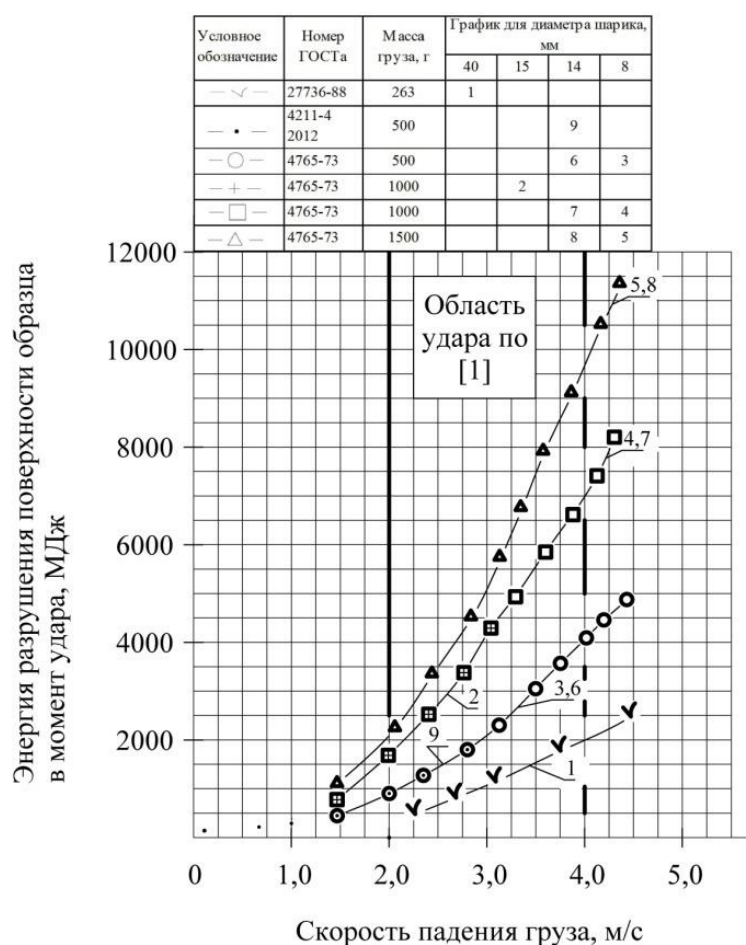


Рис. 1. Энергия разрушения поверхности образца от скорости падения груза

Скорость груза возрастает с увеличением высоты падения. Для представленных вариантов она изменяется от 0,44 м/с (график 9) до 4,42 м/с. Изменение скорости груза в диапазоне 2÷4 м/с осуществляется при высоте падения примерно от 0,2 до 0,8 м. Как видно из представленных графиков рис. 1, энергия разрушения поверхности образца в момент удара для различных условий испытания

изменяется в диапазоне скоростей от 2 до 4 м/с, от 613 (график 1) до 11399 (график 5 и 8) МДж.

В процессе удара на поверхности покрытия образуется деформированная область в виде лунки. Зона разрушения покрытия представляет собой по геометрии часть шарового сегмента. Это обосновано тем, что падающий груз ударяет шарик-боёк или сам является шаром определенного размера и массы.

Оценим распределение ударной нагрузки по криволинейной поверхности разрушения. Максимальная ее величина должна наблюдаться по направлению центральной осевой линии. Чем дальше от нее, тем меньше должно быть усилие от ударной нагрузки. Известно, что изменение усилия удара пропорционально косинусу угла, составленного нормалью к данному участку поверхности и направлением силы удара. На рис. 2 представлена схема внедрения шарика-бойка при ударе поверхности покрытия.

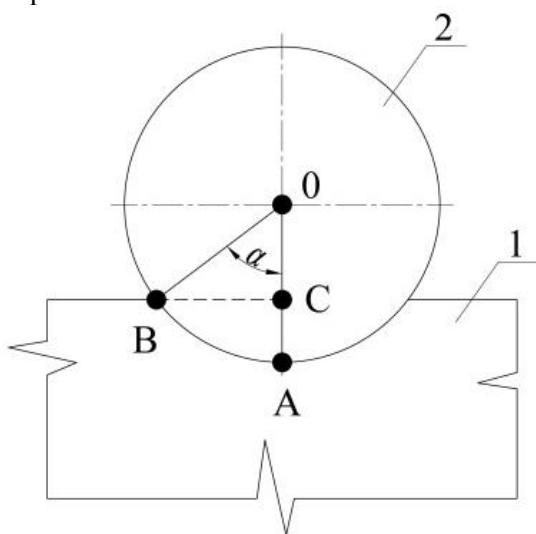


Рис. 2. Схема внедрения шарика в покрытие при ударе: 1 – покрытие; 2 – шарик-бойк

Величина $\cos \alpha$ определяется из следующего выражения

$$\cos \alpha = \frac{OC}{OB}. \quad (8)$$

Расстояние $OC = OA - CA$ или $OC = R - \delta_c$, где R – радиус шарика-бойка, мм;

δ_c – величина деформации покрытия при ударе, мм.

$$\text{Отсюда } \cos \alpha = 1 - \frac{\delta_c}{R}. \quad (9)$$

Если подставить в выражение (9) максимальное и минимальное значение R соответственно 20 и 4 мм, а также δ_c 0,05 и 0,3 мм, то вычисления показывают, величина $\cos \alpha$ незначительно отличается от единицы. Отсюда можно сделать вывод, что ударное усилие равномерно распределено по криволинейной поверхности разрушения.

В процессе удара помимо возникновения деформированной области в виде лунки,

появляются радиальные трещины, идущие во все стороны от кромки лунки. Скорость (v) их распространения как процесс изменения состояния можно оценить из следующего выражения [5]

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot 2 \cdot (1 + \mu)}}, \quad (10)$$

где E – модуль Юнга, н/м²;

ρ – плотность, кг/м³;

μ – коэффициент Пуассона.

При подстановке усредненных значений для полимерных материалов $E = 4 \cdot 10^9$ н/м², $\rho = 1200$ кг/м³ и $\mu = 0,4$ по данным [6 и 7], можно рассчитать скорость распространения радиальных трещин, которая составит 1300 м/с. Практически эта величина сравнима со скоростью звука, распространяющегося в полимерных материалах (плексиглас, полистирол и т.д.) [5].

Распространение радиальных трещин приводит к возникновению трещин кольцевых, каждая из которых распространяется по окружности на некотором расстоянии от лунки разрушения. Чем больше плотность энергии разрушения приходящейся на объемную единицу лунки, тем больше возникающих круговых трещин. Если задаться величиной деформации покрытия от 50 до 300 мкм, то для каждого варианта испытания на удар возможно определить диаметр d и площадь боковой поверхности S_ϕ лунки разрушения. Перечисленные величины определяются из следующих выражений

$$d = 2 \cdot \sqrt{\delta_c \cdot (2 \cdot R - \delta_c)}, \quad (11)$$

$$S_\phi = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \delta_c. \quad (12)$$

На рис. 3 для шариков-бойков по данным стандартов имеющих радиусы 4; 7; 7,5 и 20 мм представлены графики зависимости диаметра и площади боковой поверхности лунки разрушения от величины деформации покрытия при ударе. Наибольший размер лунки разрушения около 7 мм наблюдается при использовании шарика-бойка радиусом 20 мм при величине деформации 300 мкм. Возникающие радиальные трещины и круговые будут наблюдаться за пределами диаметра лунки 7 мм. Радиальные и круговые трещины вызваны значительной ударной нагрузкой

падающего груза на шарик-боек, вызывая быстро распространяющиеся разрушения.

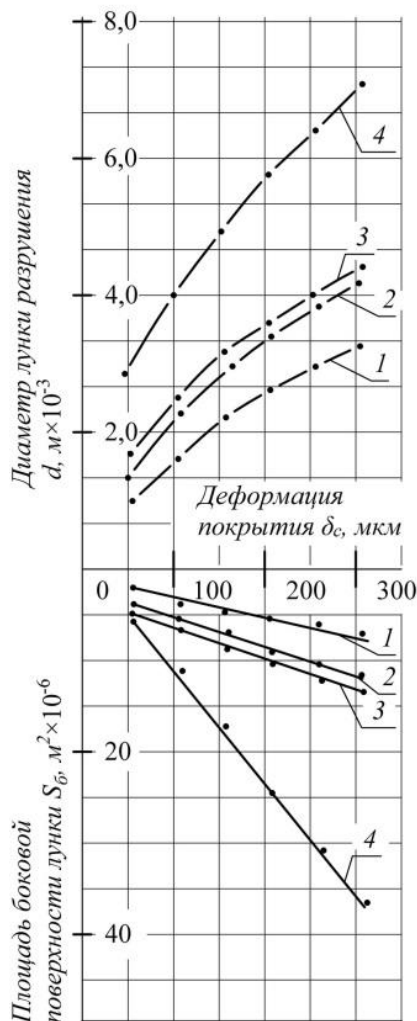


Рис. 3. Зависимость диаметра и площади боковой поверхности лунки разрушения от величины деформации покрытия при ударе: радиус шарика-бойка: 1 – 4 мм; 2 – 7 мм; 3 – 7,5 мм; 4 – 20 мм

В ударяемой части тела на поверхности покрытия возникают напряжения от приложенных нагрузок от силы инерции ударяющего груза. Сила инерции рассматривается в этом случае как статическая нагрузка. Затруднение заключается в вычислении этой силы инерции. Сложность в том, что величина продолжительности удара неизвестна. Поэтому неизвестной является величина ускорения при ударе. Для вычисления силовых нагрузок при ударе и связанных с ним напряжений и деформаций приходится пользоваться законом сохранения энергии. При ударе происходит быстрое превращение кинетической энергии падающего (ударяющего) тела в потенциальную энергию деформации.

При ударе возникают динамические деформации, развивающиеся в течение короткого промежутка времени. Параллельно росту деформаций возникают и напряжения. Учет деформаций и напряжений осуществляется за счет динамического коэффициента. Величина его определяется согласно [8] по следующей формуле

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_c}}, \quad (13)$$

где H – высота падения груза, мм;

δ_c – величина статической деформации покрытия, мм.

Возникающие динамические напряжения σ_d при ударе можно скорректировать через известные значения статических напряжений (σ_c) по следующей зависимости

$$\sigma_d = K_d \cdot \sigma_c. \quad (14)$$

Динамические напряжения при этом определяют предел прочности покрытий при восприятии ими ударной нагрузки. На рис. 4 приведены номограммы определения работы разрушения покрытия при ударе. Зная величину деформации покрытия, т.е. глубину внедрения шарика-бойка при падении груза с определенной высоты, можно рассчитать объем шарового сегмента лунки. При известной энергии деформации покрытия можно рассчитать плотность энергии разрушения. С другой стороны высота падения груза и возникающая величина деформации дает возможность рассчитать динамический коэффициент, позволяющий скорректировать значения статических напряжений. Полученные при этом возникающие динамические напряжения позволяют оценить прочность покрытий при различных вариантах удара.

Номограммы дают возможность рассмотреть работу разрушения покрытий при ударе шариками-бойками $\varnothing 40$ и 8 мм грузами соответственно 263 и 1500 г. Высота падения грузов $0,25$ и 1 м. Статические напряжения в полимерах для расчетов выбраны по [7, 9, 10] 100 и 10 МПа. Выбранные значения перечисленных величин для номограмм отражают граничные условия, возникающие при ударе при проведении исследований по ГОСТ 27736-88, ГОСТ 4211-4-2012 и ГОСТ 4765-73. Приведенные значения характеризуют условия максимального и минимального

воздействия падающего груза на поверхность покрытия при ударе.

Как видно из значений, приведенных на номограмме а) рис. 4 покрытие выдерживает ударные нагрузки при всех условиях возникающих деформаций разрушения. Предел прочности покрытий соответствует плотности энергии разрушения. Использование шарика-бойка $\varnothing 40$ мм и груза 263 г вызывает сомнение в целесообразном применении таких условий при определении ударной прочности покрытий. Покрытия выдерживают представленные условия испытания.

Номограмма б) рис. 4 дает возможность получить различные варианты при сравнении плотности энергии разрушения покрытий соответствующей характеристики, с ударной прочностью покрытия при падении груза. Как видно из данных номограммы различные варианты падения груза, могут вызвать энергию разрушения сравнимую с пределом прочности покрытий, а также иметь значения превосходящие предел прочности. Такой метод позволяет установить количественные параметры ударной прочности покрытий.

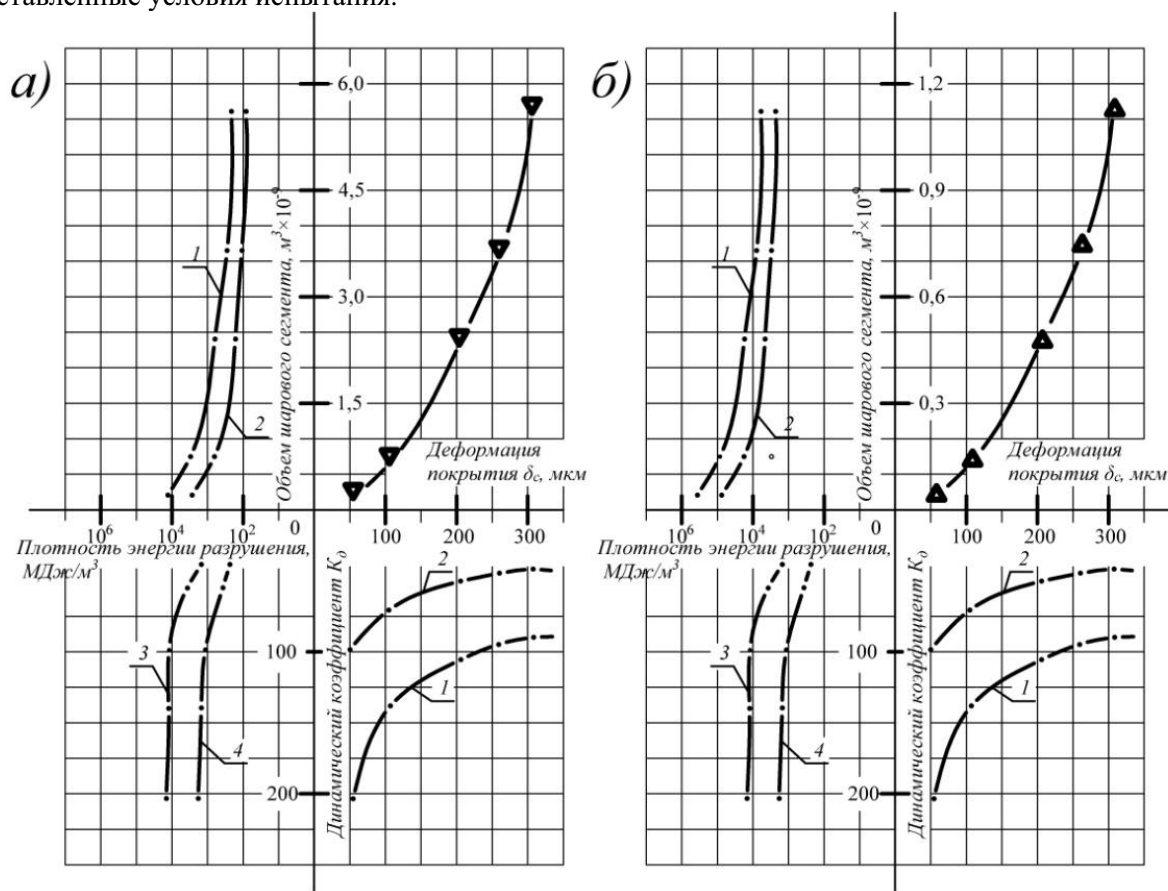


Рис. 4. Номограммы определения плотности энергии разрушения покрытия, при ударе: а) шарик-боёк $\varnothing 40$ мм, груз 263 г; б) шарик-боёк $\varnothing 8$ мм, груз 1500 г.; высота падения груза: 1-1 м; 2-0,25 м.; напряжение сжатия покрытия: 3 – 100 МПа; 4 – 10 МПа

Выводы

Наиболее отвечающим условиям эксплуатации для оценки сопротивления удару поверхностей лакокрасочных покрытий, является метод ударной нагрузки падающим грузом.

Стандарты по испытанию поверхностей покрытий на различных материалах падающим грузом предусматривают в методах использование различных высот, с которых падает груз, различные массы грузов и

диаметры шариков-бойков, передающих удар покрытию.

Такое разнообразие условий проведения испытаний подчеркивает недостаточное исследование как исходных данных для получения разрушающих нагрузок, так и возможностей сопротивления поверхностей лакокрасочных покрытий выдерживать такой вид разрушения. Поэтому во всех стандартах степень повреждения контролируемого участка поверхности лакокрасочного покрытия оценивается в баллах.

Представленная методика определения сопротивления удару лакокрасочных покрытий позволяет унифицировать условия проведения испытаний, скорректировать стандартные методы и выработать количественные показатели оценки разрушения контролируемых поверхностей.

Литература

1. Тугов И.И., Кострыкина Г.И. Химия и физика полимеров: учебное пособие для вузов. М.: Химия, 1989. 432 с.
2. Нарисава И. Прочность полимерных материалов. М.: Химия, 1987. 400 с.
3. Якубович С.В. Испытания лакокрасочных материалов и покрытий. Л.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1952. 482 с.
4. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Милковская Л.Б., Сергеев Г.П. Курс физики

том. I. Изд. второе, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1963. 401 с.

5. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. Изд. пятое, перераб. и доп. М.: Наука, 1972. 255 с.

6. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Химия, 1978. 392 с.

7. Ван-Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров. Голландия, 1972. Пер. с англ. Под ред. А.Я. Малкина. М.: Химия, 1976. 413 с.

8. Беляев Н.М. Сопротивление материалов: учебник для вузов. Изд. седьмое, испр. и доп. Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. 856 с.

9. Сухарева Л.А. Полиэфирные покрытия: структура и свойства. М.: Химия, 1987. 192 с.

10. Сухарева Л.А. Долговечность полимерных покрытий. М.: Химия, 1984. 240 с.

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

УДК 674.047

ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ УДАЛЕНИЯ СВЯЗАННОЙ ВЛАГИ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

М.Г. Ермоченков, М.Ю. Кладов

Термическое модифицирование древесины широко используется для улучшения ее свойств. Нагрев без доступа окислителя приводит к деструкции материала, которая вызывает изменение состава и структуры и, как следствие, свойств. Одним из этапов процесса термомодифицирования является сушка.

Математическое описание процессов, протекающих в материале при термическом воздействии, в том числе и на этапе сушки, предполагает наличие информации о внутренних источниках теплоты и массы. Они определяются протекающими физико-химическими процессами, связанными с сушкой и термической деструкцией. Это сопровождается поглощением или выделением определенного количества теплоты.

Удаление связанной влаги – это сложный многостадийный физико-химический процесс. Необходимо разорвать химические связи влаги с древесным веществом. Поскольку влага вступает в разные химические соединения, разрушение которых происходит в разных диапазонах температур, – процесс является многостадийным. Отдельные стадии рассматриваются как параллельные, независимые химические реакции и описываются кинетическими уравнениями. Их энергетические характеристики и кинетические параметры различны. Таким образом, на отдельных стадиях процесс сушки имеет разные значения тепловых эффектов.

Для экспериментального исследования тепловых эффектов каждой стадии процесса сушки древесины был использован метод дифференциальной сканирующей калориметрии. Эксперименты проводились в среде аргона. Результаты калориметрии были совмещены с результатами термогравиметрического исследования сушки. Для обработки результатов экспериментов

использовался метод, позволяющий разделить процесс на отдельные стадии. Эти стадии, выделяемые при обработке графиков изменения относительной массы образцов в термогравиметрических экспериментах, удовлетворительно коррелируются со стадиями, определяемыми методом сканирующей калориметрии. Результаты экспериментальных исследований представлены в графическом виде.

Была проведена совместная обработка экспериментальных данных. Она позволила определить тепловые эффекты для каждой стадии процесса удаления связанной влаги. Полученные значения сведены в таблицы. Проведено сравнение результатов экспериментально-расчетных исследований с результатами калориметрических экспериментов. Показано их удовлетворительное совпадение.

Ключевые слова: кинетика удаления связанной влаги, кинетические параметры сушки, внутренние источники теплоты и массы, тепловые эффекты сушки.

Thermal modification of wood is widely used to improve its properties. Heating without access of oxidant leads to the destruction of the material, which causes a change in composition and structure and, consequently, properties. One of the stages of the process of termoregulirovanija is drying.

The mathematical description of the processes occurring in the material during heat-who-action, including at the stage of drying involves the availability of information about the internal sources of heat and mass. They are defined proceeding physical and chemical processes associated with drying and thermal degradation. This is accompanied by the absorption or release of certain amount of heat.

Removal of bound moisture is a complex multi-stage physico-chemical process. It is necessary to break the chemical bonds of the moisture from the wood substance. As the moisture enters into different chemical compounds, the destruction which takes place at different temperature ranges, the process is multistage. Separate stages are seen as parallel, independent chemical reactions and are described by kinetic equations. Their energy characteristics and kinetic parameters are different. Thus, at some stages of the drying process has different values of thermal effects.

For the experimental investigation of the thermal effects of each stage of the process of drying the timber was used the method of differential scanning calorimetry. The experiments were carried out in argon. The results of the calorimetry were combined with the results of the thermogravimetric analysis drying. For processing the results of experiments method was used, which allows to divide the process into separate stages. These stages generated by the processing schedules change in the relative mass of the samples in the thermogravimetric experiments, satisfactorily correlate with the stages, determined by scanning calorimetry. The results of experimental studies are presented in graphical form.

Conducted joint processing of the experimental data. It is possible to determine the thermal effects for each stage of the process of removal of bound moisture. The values obtained are tabulated. Results comparison of experimental and computational studies with the results of calorimetric experiments. Shown their satisfactory coincidence.

Keywords: kinetics of removal of bound moisture, kinetic parameters of drying, internal sources of heat and mass, thermal effects of drying

Введение

Сушка широко применяется для улучшения свойств древесных материалов. Она, также, может являться одним из этапов различных технологических процессов термической обработки древесины.

Для математического описания процессов, протекающих в материале при термическом воздействии, в том числе и на этапе сушки, была разработана математическая модель [1, 2]. Она описывает тепло- и массообмен в древесине при нагреве. Одной из задач математического моделирования является описание внутренних источников теплоты и массы. Они определяются протекающими физико-химическими процессами, связанными с сушкой и термической деструкцией. Протекание процессов сопровождается

поглощением или выделением определенного количества теплоты, то есть, имеются источники теплоты [8, 9, 10, 11, 12].

Интенсивность внутреннего тепловыделения при сушке определяется скоростью изменения массы и тепловыми эффектами протекающих процессов.

$$U^{us} = \frac{d\rho_1}{d\tau} H_1 + \frac{d\rho_2}{d\tau} H_2, \quad (1)$$

где H_1 и H_2 – тепловые эффекты удаления связанной и свободной влаги соответственно Дж/кг; ρ_1 и ρ_2 – плотности связанной и свободной влаги, кг/м³.

Тепловой эффект удаления свободной воды определяется скрытой теплотой парообразования и определяется как разность

энтальпий сухого насыщенного пара воды в состоянии насыщения.

При удалении связанной воды необходимо разорвать ее химические связи с древесным веществом. Поскольку влага вступает в разные химические соединения, разрушение которых происходит в разных диапазонах температур (процесс многостадийный), энергетическая составляющая стадий различна. Таким образом, на отдельных стадиях процесс сушки имеет разные значения тепловых эффектов.

Исходя из этого уравнение (1) запишем в виде:

$$U^{ue} = \sum_{\gamma_1}^{n_1} \left(H_{\gamma_1} \frac{d\rho_{\gamma_1}}{d\tau} \right) + H_2 \frac{d\rho_2}{d\tau}, \quad (2)$$

где n_1 – количество стадий, γ_1 – номер стадий.

Таким образом, модель тепломассообмена в древесине при сушке [1, 2], предполагает наличие информации о постадийных тепловых эффектах процессов, протекающих в древесине.

Методы и материалы

Для экспериментального исследования тепловых эффектов каждой стадии процессов сушки и термической деструкции древесины воспользуемся методом дифференциальной сканирующей калориметрии – ДСК. Суть метода ДСК заключается в измерении разности тепловых потоков, подводимых к исследуемому и эталонному образцам. В ходе эксперимента регистрируется, также, средняя температура образца.

При экспериментальном исследовании использовались образцы массой $m \sim 10$ мг.

В качестве эталонного образца выбирался пустой тигель, идентичный тому, в который загружался исследуемый образец.

Исследования проводились на приборе Netzsch DSC 404 F3 в аргоне. Темп нагрева составлял $5^\circ\text{C}/\text{мин}$. Диапазон изменения температур от 23 до 112°C . Предварительно прибор был откалиброван по температуре и чувствительности на стандартных материалах для данных условий эксперимента.

На рис. 1 приведены графики зависимости от времени теплового потока, подводимого к образцу, и его температуры. В эксперименте происходило поглощение тепла образцом.

Поскольку в качестве эталонного образца использовался пустой тигель, тепловой баланс для исследуемого образца можно записать в следующем виде:

$$\Delta Q = Q_{исп} + Q_{др} + Q_{вл}, \quad (3)$$

здесь ΔQ – разница количества теплоты, подводимой к исследуемому и эталонному образцу, Дж; $Q_{исп}$ – количество теплоты на испарение влаги в древесине, Дж; $Q_{др}$ – количество теплоты на нагрев сухой древесины, Дж; $Q_{вл}$ – количество теплоты на нагрев влаги в древесине, Дж.

Переходя к тепловым потокам, приведенным к начальной массе образца, получаем:

$$\Delta q = q_{исп} + q_{др} + q_{вл}, \quad (4)$$

здесь $q = \frac{Q}{\Delta\tau \cdot m_0}$ – тепловой поток, приведенный к начальной массе образца, Вт/кг; $\Delta\tau$ – время, с; m_0 – начальная масса образца, кг.

Проинтегрировав по времени Δq получим:

$$\Delta Q_{np} = \int_0^{\tau} \Delta q d\tau, \quad (5)$$

где ΔQ_{np} – количество теплоты, подведенное к единице количества вещества исследуемого образца, Дж/кг.

С учетом уравнений (3), (4) и (5) можем записать:

$$Q_{np,исп} = \int_0^{\tau} \Delta q d\tau - \int_0^{\tau} q_{др} d\tau - \int_0^{\tau} q_{вл} d\tau. \quad (6)$$

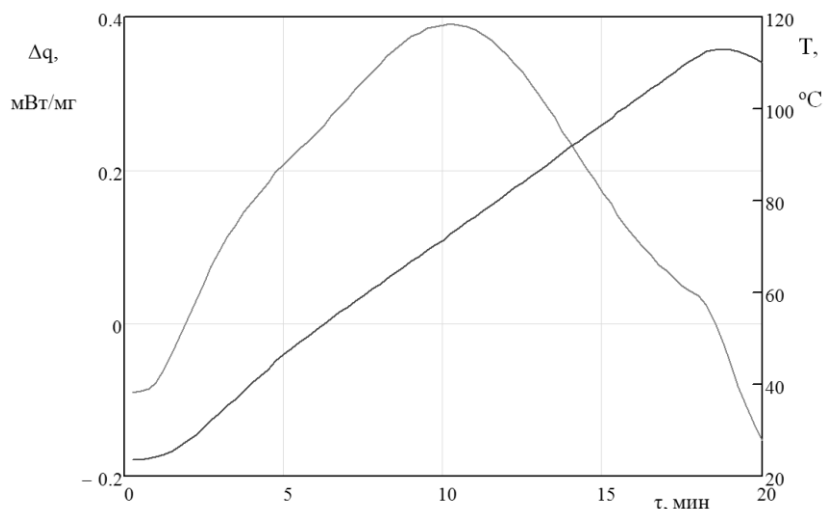


Рис. 1. Графики изменения теплового потока и температуры от времени: ——— - тепловой поток, ——— - температура

Поскольку

$$q_{\partial p} = \frac{c_{p,\partial p} m_{\partial p} \Delta T}{\Delta \tau \cdot m_0}, \quad (7)$$

$$q_{вл} = \frac{c_{p,вл} m_{вл} \Delta T}{\Delta \tau \cdot m_0}, \quad (8)$$

уравнение (6) можно переписать в виде

$$Q_{\text{пр,исп}} = \int_0^{\tau} \Delta q d\tau - \frac{1}{\Delta \tau \cdot T_0} \left(\int_0^{\tau} (c_{p,\partial p} m_{\partial p} \Delta T) d\tau - \int_0^{\tau} c_{p,вл} m_{вл} \Delta T d\tau \right) \quad (9)$$

здесь $c_{p,\partial p}$ и $c_{p,вл}$ – удельные теплоемкости сухой древесины и влаги соответственно, Дж/(кг К); $m_{\partial p}$ – масса сухой древесины в образце, кг; $m_{вл}$ – масса влаги в образце, кг.

Масса влаги в образце при нагреве меняется, то есть,

$$m_{вл} = f(T, \tau). \quad (10)$$

В явном виде зависимость (10) может быть записана соотношением [3, 4, 5, 6, 7]

$$m_{вл}(T, \tau) = \sum_{\gamma_1} \left(m_{0,вл} \omega_{0,\gamma_1} \times \exp \left[-A_{\gamma_1} \int_0^{\tau} \exp \left(-\frac{E_{\gamma_1}}{R \cdot T} \right) d\tau \right] \right) \quad (11)$$

где $m_{0,вл}$ – начальная масса влаги в образце, кг; A , E , ω_0 – кинетические параметры сушки древесины. Эти параметры были ранее получены в результате термогравиметрических исследований удаления влаги из древесины.

Так как

$$H_1 = Q_{\text{пр,исп}}, \quad (12)$$

модель (3) – (12) позволяет определить интегральный тепловой эффект удаления связанной влаги из древесины.

Результаты

Результаты проведенных экспериментальных исследований приведены в таблице 1.

Для определения постадийных тепловых эффектов продифференцируем по времени тепловой поток, подводимый к образцу. График изменения производной приведен на рис. 2. Из графика следует, что интенсивность подвода теплоты можно разделить на стадии. Эти стадии должны коррелироваться со скоростью удаления массы из образца.

Для определения значений массы образца для каждого момента времени воспользуемся уравнением (11). Кинетические параметры A , E и ω_0 получены из термогравиметрических экспериментов по удалению связанной влаги из древесины в гелиевой среде [3, 4, 5, 6, 7]. Расчеты массы образцов проводились исходя из полей температур, полученных при проведении экспериментов по сканирующей калориметрии (рис. 1). В таблице 2 приведены кинетические параметры сушки древесины в гелии. В таблице 3 приведены результаты расчетов масс образцов при проведении калориметрических экспериментов.

Сравнение результатов расчетов масс образцов с экспериментальными значениями показывает, что максимальная погрешность не превышает 2 %.

Таблица 1 - Результаты экспериментальных исследований интегральных тепловых эффектов удаления связанной влаги из древесины

Номер эксперимента	Начальная масса образца, мг	Конечная масса образца, мг	Влажность образца, %	Тепловой эффект удаления влаги, МДж/кг	Средний тепловой эффект, МДж/кг
1	13,24	12,19	7,9	3,05	2,63
2	12,69	11,51	9,3	2,78	
3	8,70	7,65	12,1	2,05	

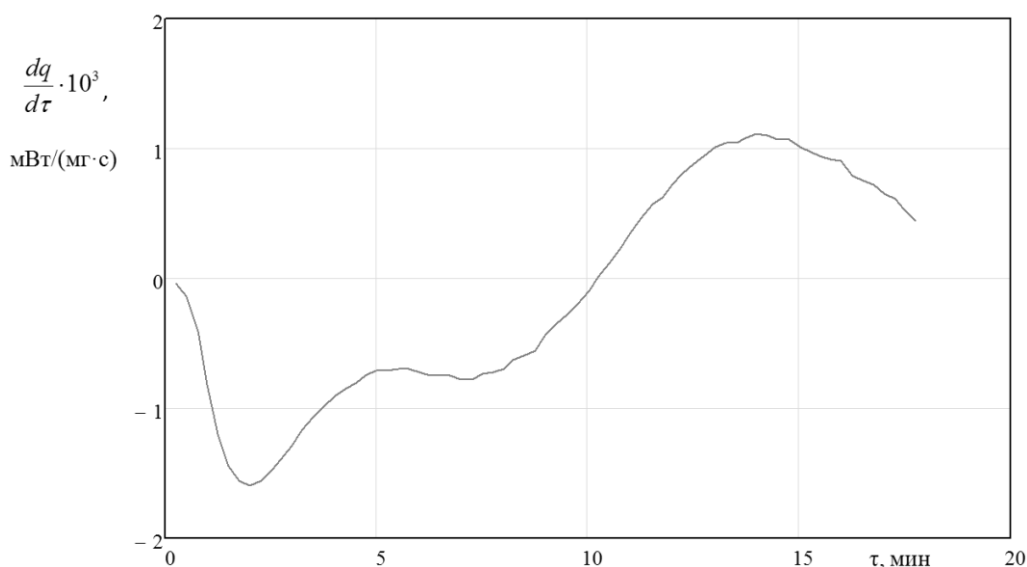


Рис. 2. График изменения по времени производной от теплового потока, подводимого к образцу

Таблица 2 - Кинетические параметры сушки древесины в гелии

Номер стадии	Температура максимума скорости стадии, T_{max}, K	Температура начала стадии, $T_{нач}, K$	Температура конца стадии, $T_{кон}, K$	Начальная масса стадии, ω_0	Энергия активации, $E/R, K$	Частотный фактор, A, c^{-1}
1	322	-	354	0,310	6693	$2,592 \cdot 10^6$
2	341	-	370	0,400	7969	$4,591 \cdot 10^7$
3	366	320	389	0,177	10292	$7,717 \cdot 10^9$
4	386	303	-	0,113	5650	$5,451 \cdot 10^3$

Таблица 3 - Массы образцов в калориметрическом эксперименте

Номер образца	Начальная масса образца, мг	Конечная масса образца, мг		Погрешности расчета массы	
		экспериментальная	расчетная	абсолютная	относительная
1	13,24	12,19	12,27	0,082	0,006
2	12,69	11,51	11,72	0,22	0,017
3	8,70	7,65	7,73	0,082	0,009

На рис. 3 приведены графики изменения по времени расчетных значений относительных масс образцов в калориметрическом эксперименте.

На рис. 4 приведены расчетные значения скорости потери массы образцов при сканирующем калориметрировании (сплошная линия). На этом же рисунке построен график

производной по времени количества теплоты, подводимого к образцу (точки). Из графиков следует, что наблюдаемые стадии и в том и в другом случае удовлетворительно коррелируются. Таким образом, можно совместить результаты экспериментальных и расчетных исследований.

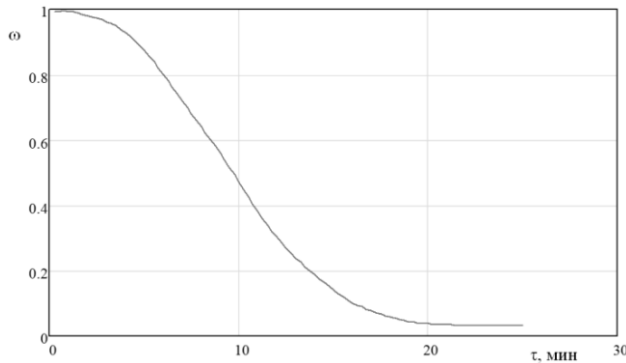


Рис. 3. Изменение относительной массы образца по времени

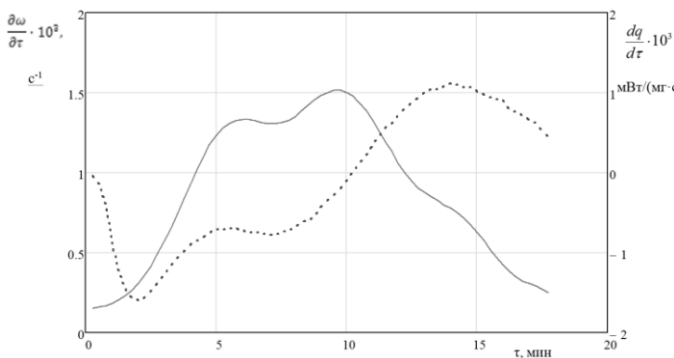


Рис. 4. Результаты совмещения результатов сканирующей калориметрии (· · · · ·) и расчетных значений потери массы образца (—)

Исходя из этого, для многостадийного процесса уравнение (3) можно переписать в виде:

$$\Delta Q = \sum_{\gamma_1}^{n_1} Q_{\gamma_1, исп} + Q_{\partial p} + Q_{вл}, \quad (13)$$

где $Q_{\gamma_1, исп}$ – количество теплоты на испарение влаги γ_1 -й стадии, Дж.

Переходя к тепловым потокам, приведенным к начальной массе образца, получаем:

$$\Delta q = \sum_{\gamma_1}^{n_1} q_{\gamma_1, исп} + q_{\partial p} + q_{вл}. \quad (14)$$

С учетом (5) и (6)

$$Q_{пр, исп} = \sum_{\gamma_1}^{n_1} \int_0^{\tau} \Delta q_{\gamma_1} d\tau - \int_0^{\tau} q_{\partial p} d\tau - \int_0^{\tau} q_{вл} d\tau. \quad (15)$$

Используя выражения (7) и (8) получаем

$$Q_{пр, исп} = \sum_{\gamma_1}^{n_1} \int_0^{\tau} \Delta q_{\gamma_1} d\tau - \frac{1}{\Delta \tau \cdot m_0} \times \left(\int_0^{\tau} (c_{p, \partial p} m_{\partial p} \Delta T) d\tau - \int_0^{\tau} c_{p, вл} m_{вл} \Delta T d\tau \right). \quad (16)$$

Учитывая, что

$$Q_{пр, исп} = \sum_{\gamma_1}^{n_1} H_{\gamma_1} \frac{d\rho_{\gamma_1}}{d\tau}, \quad (17)$$

записывая уравнение (16) для конкретной i -й точки получим систему уравнений:

$$\sum_{\gamma_1}^{n_1} H_{\gamma_1} \frac{dm_{\gamma_1, вл}}{d\tau} = \sum_{\gamma_1}^{n_1} \int_0^{\tau} \Delta q_{i, \gamma_1} d\tau - \frac{1}{\Delta \tau_i \cdot m_0} \times \left(\int_0^{\tau} (c_{p, \partial p} m_{\partial p} \Delta T_i) d\tau - \int_0^{\tau} c_{p, вл} m_{вл} \Delta T_i d\tau \right), \quad (18)$$

где $i = 0 \dots m$ – номера экспериментальных точек.

Потеря массы влаги γ_1 -й стадии определяется из соотношения

$$\frac{dm_{\gamma_1, вл}}{d\tau} = m_{\gamma_1, 0} \omega_{\gamma_1, 0} A_{\gamma_1} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\gamma_1}}{RT}\right). \quad (19)$$

Решая систему (18) – (19) относительно H_{γ_1} можно определить тепловые эффекты каждой стадии процесса дегидратации древесины.

Результаты экспериментально-расчетных исследований приведены в таблице 4. Из приведенных данных следует, что тепловые эффекты дегидратации древесины для разных стадий различны и меняются в широких пределах. На рис. 5 приведены графики экспериментальных и расчетных зависимостей от времени тепловых потоков, подводимых к образцу.

Таким образом, получены интегральные и постадийные тепловые эффекты удаления

связанной влаги. Они могут быть использованы для расчета тепломассообмена в древесине при

сушке и термическом модифицировании.

Таблица 4 - Результаты исследования постадийных тепловых эффектов дегидратации древесины

Номер стадии	Средний тепловой эффект стадии, $H \cdot 10^{-6}$	Количество теплоты, подведенное к образцу для испарения влаги, Дж		Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
		экспериментальное значение	расчетное значение		
1	3,12	3,28	3,047	0,23	0,07
2	3,13				
3	2,99				
4	2,56				

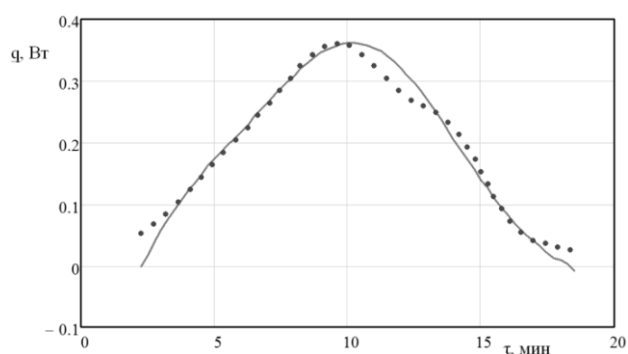


Рис. 5. Графики изменения по времени тепловых потоков, подводимых к образцу: — экспериментальные значения; — расчетные значения

Литература

1. Ермоченков, М.Г. Математическая модель процессов, протекающих в древесине при интенсивной сушке. Строение, свойства и качество древесины / М.Г. Ермоченков, Ю.П. Семенов; Труды IV Международного симпозиума. — СПб.: СПбГЛТА, 2004. Стр. 530-533.
2. Ермоченков, М.Г. Математическая модель процессов, протекающих в древесине при интенсивном тепловом воздействии / М.Г. Ермоченков, Ю.П. Семенов. // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов. Материалы семинара. - Воронеж, ВГЛТА. - 2010. — С. 409-417.
3. Ермоченков, М. Г. Внутренние источники теплоты и массы в древесине при термическом модифицировании / М.Г. Ермоченков // 14 Минский международный форум по тепломассообмену. — Минск, 2012.
4. Шведов, Б. А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем: дисс. ... докт.

техн. наук / Б.А. Шведов. — М.: МЛТИ, 1990. — 542 с.

5. Жигунов, С.В. Тепломассообмен и кинетика термодеструкции при высокотемпературном нагреве композиционных материалов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.05 / С.В. Жигунов. — М.: МГУЛ, 1990. — 184 с.

6. Венгер, А.Е. Исследование кинетики процессов термического разложения полимерных материалов посредством термогравиметрического анализа / А.Е. Венгер, Ю.Е. Фрайман // ИФЖ. — 1981. - Т. 40. - № 2- С. 278-287.

7. Ермоченков, М.Г. Влияние относительной влажности воздуха в порах древесины на энергию активации парообразования при интенсивном нагреве / М.Г. Ермоченков, Ю.П. Семенов, А.Г. Евстигнеев, Т.Е. Кувик // Технология и оборудование для переработки древесины: научные труды. — М.: МГУЛ, 2008. - Вып. 342. — С. 9-13.

8. Peters, B; Bruch, C Drying and pyrolysis of wood particles: experiments and simulation / JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS, 2003. — Vol. 70. — Is. 2. — Pp. 233-250.

9. Xu, Qixiang; Pang, Shusheng. Mathematical Modeling of Rotary Drying of Woody Biomass / 3rd World Forum on Crystalization, Filtration and Drying: Mumbai, INDIA // DRYING TECHNOLOGY, 2008. — Vol. 26. — Is. 11. — Pp. 1344-1350.

10. Di Blasi, C.; Branca, C.; Masotta, F. And etc. Experimental Analysis of Reaction Heat Effects during Beech Wood Pyrolysis / ENERGY & FUELS, 2013. — Vol. 27. — SI. 5. — Pp. 2665-2674.

11. Collignan, A; Nadeau, JP; Puiggali, JR. Description and analysis of timber drying kinetics / DRYING TECHNOLOGY, 1993. – Vol. 11. – Is. 3. – Pp. 489-506.

12. Yu, Hongbo; Liu, Fang; Ke, Ming and etc. Thermogravimetric analysis and kinetic study

of bamboo waste treated by Echinodontium taxodii using a modified three-parallel-reactions model / BIORESOURCE TECHNOLOGY, 2015. – Vol. 185. – Pp. 324-330.

©М.Г. Ермоченков – доцент кафедры «Теплофизики», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет), Мытищинский филиал, e-mail: ermochenkova@mgul.ac.ru; М.Ю. Кладов – канд. техн. наук, ОАО «Композит».

УДК 674.47

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСУШЕНИЯ АГЕНТА СУШКИ МЕТОДОМ КОНДЕНСАЦИИ

Ш.Г. Зарипов, Ю.С. Пунтусова

На протяжении многих лет сушка древесины считалась экологически чистым процессом. В последнее время исследования показали, что кроме значительного расхода тепловой энергии при сушке древесины, одной из остро назревающих проблем является экологическая сторона данного вопроса. Проведённый химический анализ жидкости, выделяющейся из древесины в процессе сушки, показал, что вместе с парогазовой смесью из древесины выделяется и большое количество различных химических соединений, растворенных в воде - фурфурол, формальдегид, фенол и др. Многие из перечисленных веществ являются вредными для человека и окружающей среды. Конструкции большинства сушильных камер периодического действия предусматривают удаление испаряемой влаги и растворенных в ней веществ с отработанным агентом сушки, путем прямого выброса в окружающую среду. При этом помимо вредных веществ удаляется большое количество тепловой энергии. В данной статье рассматриваются мероприятия, которые позволят повысить эффективность утилизации выделяемого при сушке древесины водного раствора и, тем самым минимизируют воздействие вредных веществ на окружающую среду и человека, а также дадут возможность сэкономить значительную часть тепловой энергии.

Ключевые слова: сушка древесины, конвективная сушка, тепловая энергия, агент сушки, утилизация, осушение, влагоперенос, массообмен, массоперенос.

For many years wood drying has been considered to be an environmentally friendly process. Recent studies have shown that in addition to the significant consumption of thermal energy for wood drying, one of the acute emerging problems is the ecological aspect of this issue. Chemical analysis of the liquid removed from the wood during the drying process showed that besides the gas-vapor mixture from the wood a large number of different chemical compounds, dissolved in the water, were also removed. They are furfural, formaldehyde, phenol, etc. Many of these substances are harmful to humans and the environment. Designs of the majority of drying chambers of periodic action provide removal of the evaporated moisture and the substances, dissolved in it with the exhaust drying agent, by direct emission into the environment. In addition to harmful substances, a large amount of thermal energy is removed. This article discusses the measures that will enable to improve the efficiency of utilization of the water solution generated by wood drying and thereby to minimize the impact of harmful substances on the environment and humans, as well as to provide an opportunity to save a significant part of thermal energy.

Keywords: wood drying, convective drying, thermal energy, drying agent, utilization, unwatering, moisture transfer, mass exchange, mass transfer.

Введение

Длительное время существовало мнение о том, что конвективная сушка пиломатериалов – это экологически безвредное производство, так как из древесины при сушке выделяется только

влага и воздух. Поэтому проблеме влияния производства сухих пиломатериалов на экологическую обстановку в определённом регионе не уделялось должного внимания.

Вместе с тем более детальное изучение данной проблемы показало, что конвективная сушка пиломатериалов из древесины как лиственных [1-2], так и хвойных пород [3] не может быть отнесена к экологически безвредным производствам. Полученные данные в процессе опытных сушек показали, что даже незначительный нагрев древесины (40 ... 60°C) переводят её из химически пассивной среды в активную. Наблюдается деструкция древесины, при которой происходит выделение таких веществ, как фурфурол, фенол, формальдегид и много других веществ, которые способны ухудшать экологическую обстановку [1], [3].

Химизм процесса ещё предстоит изучить. В то же время ущерб окружающей среде, который наносит технология конвективной сушки пиломатериалов, очевиден. Об этом свидетельствуют элементарные расчёты. Так при сушке лиственных пиломатериалов ($t_c = 65^\circ\text{C}$) в каждом литре водного раствора, который выделяется из древесины содержится: фенола - 0,2 мг (при природном фоне 0,002 мг/л), формальдегида - 3 мг (при природном фоне 0). Средняя величина массы воды, удаляемой из 1 м³ древесины составляет от 200 кг и выше. Тогда масса фенола, которая выводится в атмосферу из 1 м³, составляет 40 мг, формальдегида - 600 мг. Аналогичная картина наблюдается по таким элементам как ион аммония, химическая потребность в кислороде (ХПК) и др.

Не менее значимой проблемой при сушке пиломатериалов любой породы – это потребное количество тепловой энергии. Общепринято, что тепловая энергия расходуется на испарение влаги из древесины (2490 кДж/кг), нагрев камеры и древесины (340 кДж/кг), нагрев наружного воздуха (2261 кДж/кг), испарение увлажняющей воды (898 кДж/кг), а также потери через ограждения камеры (1327 кДж/кг) [4-5]. В настоящей работе особое внимание будет уделено такой статье расхода тепловой энергии, как нагрев наружного воздуха.

Данный вид энергии расходуется на поддержание такого показателя режима сушки как относительная влажность агента сушки. Для регулирования указанного параметра в подавляющем большинстве случаев используется относительно простой способ – замена парогазовой смеси сушильной камеры, что нельзя отнести к категории эффективных мероприятий.

Отработавший агент сушки, который удаляется из сушильной камеры, содержит значительное количество тепловой энергии, которое следовало бы сохранить для дальнейшего использования. Поэтому способ осушения агента сушки при конвективной сушке, основанный на прямой замене парогазовой смеси является малоэффективным как с экологической, так и с экономической стороны. Тем не менее, данный способ утилизации, выделенной из древесины парогазовой смеси является основным.

Цель данной работы: обосновать альтернативный способ утилизации загрязняющих веществ, который позволяет максимально снизить негативное влияние вредных веществ на окружающую среду при максимальном сохранении теплосодержания агента сушки.

Объекты и методы исследования

При разработке способа утилизации загрязняющих веществ необходимо определить исходные условия происходящих производственно-технологических процессов. Исследования показали, что конвективная сушка лиственных пиломатериалов аналогична баромембранному процессу разделения растворов [3], что позволяет принципиально изменить подход к процессу регулирования относительной влажности агента сушки.

При таком подходе перенос влаги при сушке древесины рассматривается как процесс, протекание которого не зависит от влагообмена. Здесь более значимым является обеспечение удаления влаги с поверхности доски, которая выводится из древесины, что позволяет соблюдать правило «сколько влаги выделилось из древесины, столько и подлежит удалению». В настоящее время такой принцип успешно используется в сушильных камерах непрерывного действия. Следовательно, нет необходимости выстраивать структуру режимов сушки пиломатериалов относительно равновесной влажности агента сушки. Достаточно на протяжении всего периода сушки поддерживать значение относительной влажности агента сушки на уровне $\varphi \cong 90\%$ [6].

Наличие в парогазовой смеси таких веществ как фурфурол и формальдегид при сушке бука и дуба [1-2], а также фенола и формальдегида и др., указывает на то, что основополагающим процессом при

конвективной сушке является химическая активность древесины при повышении температуры. В результате на поверхность доски выводится определённый перечень веществ путём проникновения через систему полупроницаемых мембран, которыми располагает определённая порода древесины.

На втором этапе уже на поверхности доски происходит разделение раствора на две основные группы веществ. Одна группа веществ удаляется с поверхности доски, а другая накапливается в виде пермеата. В изучаемом вопросе определённый интерес представляет та группа веществ, которая удаляется с поверхности доски. Данный вопрос рассмотрим на примере сушки лиственничных пиломатериалов.

Агрегатное состояние. Для более полного понимания данного аспекта проблемы необходимо рассмотреть степень синхронности процессов по массовому балансу - массоперенос и массообмен. Необходимость изучения данного аспекта заключается в том, что эти два процесса при сушке лиственничных пиломатериалов независимы друг от друга. Поэтому протекают с различной интенсивностью.

Так, начальный период сушки характеризуется многократным превышением интенсивности массопереноса над массообменом. Поэтому в этот период сушки основная масса влаги, которая выделяется из древесины, с поверхности доски стекает на пол сушильной камеры в капельножидком состоянии. В этот период сушки только незначительная масса воды, а также парогазовая смесь удаляется путём испарения, наполняя в короткие промежутки времени сушильное пространство, доводя значение ϕ до 100%. Продолжительность этого периода при сушке лиственничных пиломатериалов составляет порядка 30 ... 35 ч.

В дальнейшем наблюдается повышение потенциала испарения [3] при снижении интенсивности массопереноса. В результате на поверхности доски происходит разделение раствора испарением на летучие составляющие и сухой остаток. Следовательно, вещества, которые способны загрязнять окружающую среду находятся как в водном растворе (жидкое агрегатное состояние), так и в парогазовой смеси. Таким образом, при разработке способа утилизации загрязняющих веществ необходимо

предусмотреть утилизацию как жидкой фазы, так и газообразной.

Химический состав. Изучение данного вопроса проводилось как прямым, так и косвенным способом. Результаты прямого способа определения приведены в таблице [3].

Таблица 1 - Содержание химических соединений в парогазовой смеси сушильной камеры при сушке древесины лиственницы

№ п/п	Наименование	Содержание примесей в конденсате, мг/дм ³	
		48°C	65°C
1	Нитрит-ион	0,03	0,04
2	Ион аммония	9	9
3	Нитрат-ион	0	0,2
4	Взвешенные	0	13
5	ХПК	110	100
6	Фенолы	0,06	0,2
7	Формальдегиды	0,12	0,3
8	Водородный показатель pH	4,8	4,8
9	Хлориды	2	5
10	Сульфаты	10	10

Полученная парогазовая смесь при нагреве древесины лиственницы до 84°C подвергалась химическому анализу методом ИК-спектроскопии.

При проведении экспресс-анализа было снято два типа спектров:

- 1 – ИК-спектр равновесия парогазовой смеси над конденсатом в газовой кювете относительно сухого воздуха камеры;

- 2 – ИК-спектр жидкого конденсата, нанесённого слоем определённой толщины на таблетку KBr, относительно чистого KBr.

В общей сложности, на ИК-спектре парогазовой смеси в газовой камере пронумеровано и отнесено к определенным структурным единицам 139 пиков. На ИК-спектре конденсата на таблетке KBr всего 10 пиков.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспресс-анализа парогазовой смеси:

1. В парогазовой среде присутствует смесь летучих с паром веществ с функциональными группами воды (в том числе кристаллизационной в гидратах), спиртов,

фенолов, карбоновых кислот алифатического и ароматического рядов, а также непредельных соединений.

2. В области «отпечатков пальцев» ИК-спектра парогазовой смеси обнаружены полосы поглощения таких структурных единиц молекул как $-C-S$; $=C-H$; $-C-O-$; NO_2 . В парогазовой смеси конденсата присутствуют соединения, в состав которых входят эти структурные единицы.

3. ИК-спектр конденсата на таблетке бромистого калия показывает наличие веществ с функциональными группами органических серосодержащих соединений, воды, спиртов, фенолов, карбоновых кислот.

Из полученных данных видно, что в процессе сушки из древесины лиственницы выделяется широкий спектр веществ, который следует отнести к группе обязательных. Поэтому следует ожидать негативное воздействие на окружающую среду по широкому спектру элементов. Это значит, что необходимо предусмотреть универсальный способ сбора и очистки веществ, которые относятся к группам спиртов, фенолов, карбоновых кислот алифатического и ароматического рядов, а также непредельных соединений.

Такую комплексную нейтрализацию указанных групп веществ можно осуществить только на крупных очистных сооружениях. Поэтому наиболее эффективным способом сбора загрязняющих веществ является перевод парогазовой смеси в жидкую фазу путём конденсирования и дальнейшей транспортировкой полученного конденсата на нейтрализацию.

Сушка пиломатериалов – технологический процесс, который сопровождается заменой увлажнённого агента сушки на более сухой, который закачивается в сушильную камеру. На доведение полученной парогазовой смеси до заданного температурного уровня режима сушки необходимо дополнительные объёмы тепловой энергии, количество которой соразмерно с тепловой энергией, которая затрачивается на испарение влаги с поверхности доски.

С целью сокращения указанной группы тепловой энергии в настоящее время с определённой эффективностью в сушильных камерах применяются различные виды экономайзеров, а также конденсационные установки, где хладагентом является фреон.

Однако оба указанных способа экономии тепловой энергии не нашли широкого применения в сушке пиломатериалов по различным причинам.

Так, использование экономайзеров показывает определённую экономическую эффективность только в сушильных камерах непрерывного действия в холодный период года. Как показала практика сушки, в сушильных камерах периодического действия эксплуатировать экономайзеры нецелесообразно. Конденсационные камеры имеют ограниченное использование по причине дорогой и сложной эксплуатации. Одной из основных причин сложности эксплуатации является использование в качестве хладагента фреона [7]. В то же время каждый из вышеперечисленных методов поддержания режимных показателей содержит рациональное зерно.

Опыт эксплуатации сушильных камер непрерывного действия указывает на то, что не требуется осушать весь поток агента сушки, который циркулирует в сушильной камере. Частичное удаление увлажнённого воздуха указывает на то, что из сушильной камеры удаляется влаги ровно столько, сколько её выделилось из древесины. Эксплуатация конденсационных сушильных камер указывает на возможность осушения агента сушки практически на любую «глубину» [8-10].

Следовательно, на начальном этапе изучения данной проблемы необходимо было установить «глубину» осушения. На втором – определить объём воздушных масс, требующих осушения.

Глубина осушения устанавливается исходя из уровня относительной влажности агента сушки, который устанавливается в сушильной камере. Опыт эксплуатации сушильных камер показал, что для получения высококачественных пиломатериалов в сушильной камере целесообразно поддерживать степень насыщенности на уровне $\varphi \cong 90\%$. Расчёты показали, что для этого не требуется глубокого осушения воздуха. Так, при температуре агента сушки в сушильной камере $t_c = 40^\circ C$ точка росы составляет $t_p = 38^\circ C$, при $t_c = 60^\circ C$, $t_p = 57,8^\circ C$.

Таким образом, для получения конденсата понижение температуры агента сушки не превышает $3^\circ C$, что не представляет большой технической проблемы. Для выполнения указанного условия в качестве хладагента

может быть использована технологическая вода при температуре $t_w = 18 \dots 20^\circ\text{C}$.

Объём воздушных масс, требующих осушения определяется по экспериментальным данным (рисунок 1). По полученным данным устанавливается масса влаги, которая выводится при экстракции раствора на поверхность доски площадью в 1 м^2 в 1 ч. Далее рассчитывается площадь поверхности пиломатериалов, с которой осуществляется испарение влаги.

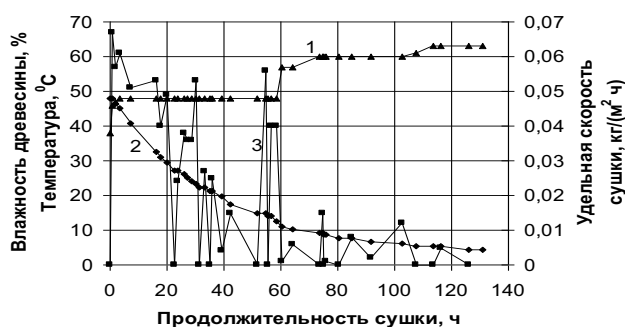


Рис. 1. Кинетика сушки лиственничных пиломатериалов сечением $25 \times 100\text{ мм}$: 1 – температура агента сушки; 2 – влагосодержание древесины; 3 – удельная скорость сушки

Здесь следует указать на особенности протекания процесса сушки. На начальном этапе сушки наблюдается интенсивная экстракция водного раствора, а значит и влаги

на поверхность доски, независимо от режима сушки и сечения доски. Расчёты показали, что для удаления влаги, которая находится на поверхности доски, требуется скорость циркуляции агента сушки в сушильной камере, равной $v \cong 18\text{ м/с}$, что технически нереально осуществить. При начальной температуре сушки равной $t_c = 48^\circ\text{C}$ $G_{w\text{ max}} = 0,069\text{ кг/(м}^2\text{/ч)}$, $t_c = 80^\circ\text{C}$ значение удельной скорости сушки достигает $G_{w\text{ max}} = 0,35\text{ кг/(м}^2\text{/ч)}$. Поэтому в указанный период сушки основная масса влаги с поверхности доски удаляется путём элементарного слива на пол камеры. Время интенсивной экстракции для лиственничных пиломатериалов варьируется от 11 ч. до 60 ч.

По окончании периода интенсивной экстракции вся влага, которая выделяется из древесины, из сушильной камеры выводится через осушитель.

Лабораторные испытания, которые были проведены на полупромышленной сушильной камере, ёмкость которой составляет $V_{\text{загр.}} = 1\text{ м}^3$ (рисунок 2) показали, что для получения высококачественных пиломатериалов целесообразно поддерживать на протяжении всего периода сушки значение степени насыщенности на уровне $\phi \cong 90\%$.

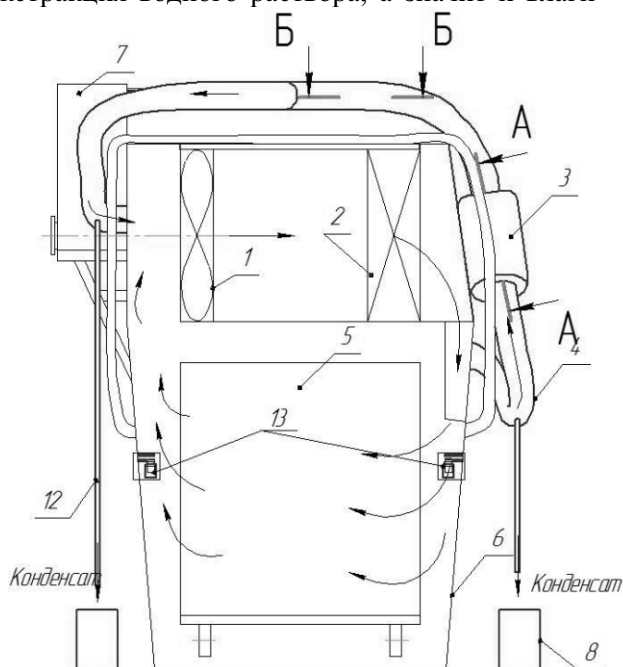
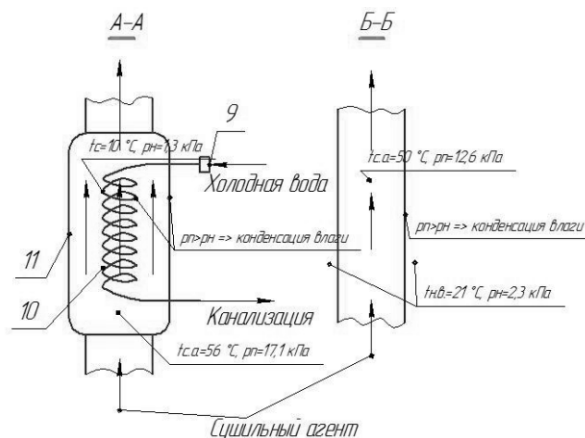


Рис. 2. Схема экспериментальной сушильной камеры рабочим объёмом по условному материалу 1 м^3 : 1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3 – осушитель; 4 – воздуховод; 5 – штабель пиломатериалов; 6 – ограждения камеры; 7 – защитный кожух; 8 – контейнер для сбора конденсата; 9 – кран подачи холодной воды; 10 – спираль охладителя; 11 – корпус осушителя; 12 – шланг слива конденсата; 13 – психрометр.



В разработанной конструкции сушильной камеры функционирует два аэродинамических контура – основной и осушения. По основному контуру осуществляется циркуляция агента сушки через калорифер и штабель пиломатериалов в объеме $V_{\text{ц}}$. Объем циркулирующего агента сушки по контуру осушения составляет порядка $V_{\text{к}} \cong 0,01 \cdot V_{\text{ц}}$, основным элементом которого является осушитель. Проходя через осушитель, часть циркулирующего по контуру осушения агента сушки омывает охлажденные технологической водой медные трубки. В результате на стенках трубок осушителя образуется конденсат, который стекает в резервуар.

Такого объема циркулирующего агента сушки по контуру осушения достаточно, чтобы поддерживать степень насыщенности в сушильной камере на уровне $\phi \cong 90 \%$.

Необходимо указать на ряд особенностей использования данного метода осушения:

1. Процесс сушки протекает без использования такой технологической операции как влаготеплообработка, так как испаренная с поверхности доски влага в относительно короткий промежуток времени доводит степень насыщенности до $\phi = 100 \%$.

2. По завершению начального прогрева пиломатериалов наблюдается интенсивная экстракция раствора из древесины, что предопределяет повышенную скорость удаления влаги. В этот период основная часть влаги удаляется с поверхности доски путём элементарного слива её на пол камеры. Небольшая часть влаги из камеры удаляется с помощью конденсатора.

Заключение

Экспериментально доказано, что в выделенной при сушке пиломатериалов парогазовой смеси содержится большое количество опасных веществ. Для эффективной нейтрализации этих веществ обязательным условием является перевод всей массы выделенных веществ в однородную по своему физическому составу.

На основании проведенных исследований была разработана технология осушения агента сушки методом конденсации. Данная

технология позволяет перевести выделенную парогазовую смесь в жидкое состояние для очистки с последующей утилизацией. Помимо этого, данная технология позволяет поддерживать степень насыщенности воздуха на уровне $\phi \cong 90 \%$, что позволяет получить высококачественный пиломатериал.

Описанный способ позволяет сэкономить тепловую энергию, которая, при современной технологии сушки, расходуется на нагрев наружного воздуха, т.к. вместе с увлажненным воздухом в атмосферу выбрасывается и значительная часть "полезной" тепловой энергии.

Рекомендуется удалять влагу из агента сушки, пропуская часть парогазовой смеси через конденсатор (осушитель), где хладагентом является техническая холодная вода.

Литература

1. Михайлова Ю.С. // Научный журнал КубГАУ, 70(06), 1 - 12 (2011).
2. Михайлова Ю.С. // Лесотехнический журнал, 3, 24 - 27 (2011).
3. Зарипов, Ш. Г. Совершенствование технологии сушки листовых пиломатериалов [Текст]: дис. ... д. т. наук / Ш. Г. Зарипов. – Архангельск: САФУ, 2016. – 244 с.
4. Гороховский, А. Г., Шишкина Е.Е. // Деревообрабатывающая промышленность, 4, 9–10 (2005).
5. Голицын, В. П., Голицына Н.В. // Лесной эксперт, 16, 18-25 (2004).
6. Зарипов, Ш. Г., Ермолин В.Н. // Хвойные бореальной зоны, 3-4, 352-354 (2010).
7. Расев, А. И., Кучер С.А. // Дерево.RU, 6, 118-122 (2011).
8. Шубин, Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины [Текст]: учеб. пособие / Г. С. Шубин. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 336 с.
9. Соколов П.В. Лесосушильные камеры / П.В.Соколов, Г.Н. Харитонов, С.В. Добрынин. – М.: Лесная промышленность, 1987. – 184 с.
10. Акишенков С.И. Проектирование лесосушильных камер и цехов: учебник / С.И. Акишенков, В.И. Корнеев. – СПб.: СПбГЛТА, 2008. – 511с.

УДК 674.09

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МАЛОЭТАЖНЫХ ДОМОВ

П.А. Угаров, С.Н. Рыкунин, В.П. Суров

В современном малоэтажном строительстве применяются различные материалы и технологии. Появляются новые, улучшаются характеристики существующих. Актуальными становится вопросы: является ли древесина основным материалом в малоэтажном строительстве? Отвечает ли она современным требованиям? Какие перспективы у этого материала? Для этого необходимо решить следующие задачи:

- 1. Выбрать наиболее значимые и распространенные в нашей стране технологии строительства в малоэтажном строительстве.*
- 2. Определить критерии для сравнения материалов.*
- 3. Сопоставить свойства и параметры материалов ограждающих конструкций.*
- 4. Провести анализ полученных значений.*

Поставленные задачи выявили, что основными параметрами и свойствами материалов оказались те, что отвечают за теплопроводность ограждающих конструкций зданий. Значительными являются затраты тепловой энергии на отопление.

Была выдвинута гипотеза, что одним из способов решения этой задачи, является использование модульной конструкции дома, где основные помещения, так называемый жилой минимум, изготавливаются из более дорогих материалов, обладающих хорошими теплоизолирующими и экологическими свойствами, а остальные помещения из более дешёвых материалов, как предназначенные для сезонного проживания. По результатам анализа гипотеза подтвердилась

Ключевые слова: малоэтажное строительство, клеёный брус, SIP панели

Various materials are used in modern low-rise construction. There are new, improved characteristics of existing. The question of whether wood is the main material in low-rise construction becomes actual? Does it meet your requirements? What are the prospects for this material? To do this, you need to solve the following tasks:

- 1. Choose the most significant and widespread in our country construction technologies in low-rise construction.*
- 2. To define the criteria for comparison of materials.*
- 3. Compare properties and parameters of materials of enclosing structures.*
- 4. To analyze the obtained values.*

The tasks revealed that the main parameters and properties of the materials were those responsible for the thermal conductivity of building envelopes. The costs of thermal energy for heating is very large.

One of the ways to solve this problem, it is proposed to use the modular design of the house, where the main premises, the so-called minimum living, are made of more expensive materials with good thermal insulation and environmental properties, and the rest of the premises from cheaper materials, as intended for seasonal living.

Keywords: low-rise construction, glued beam, SIP panels

В современном малоэтажном строительстве применяются различные технологии и материалы.

Основные технологии строительства в деревянном домостроении:

- дома из массивной древесины
- дома каркасные
- дома панельные

Под массивной древесиной подразумевается использование основного строительного материала в виде брёвен, оцилиндрованных в заводских условиях, брёвен рубленых, брус клееный и брус цельный.[1]

Рубленое бревно не отличается ровным внешним видом и идеальной подгонкой, зато имеет неповторимый характерный облик и большую долговечность (благодаря большей сохранности защитного слоя (заболони)).

Зато оцилиндрованные бревна не требуют дополнительной отделки, имеют аккуратный внешний вид и позволяют значительно ускорить сборку дома.

Брус цельный, производится обработкой четырёх сторон канта. Часто пользуются профилированным брусом, придавая определённый профиль материалу. Это позволяет более тщательно подогнать детали

друг к другу. Сборка дома ускоряется, отделочные работы упрощаются.

Клеёный брус производят путём переклеивания между собой ламелей определённого размера. Существует возможность добавлять к этим материалам различные виды утеплителя.

Отличие каркасной технологии определяется возведением каркаса здания прямо на месте строительства. Каркас является несущей конструкцией здания. Обычно он изготавливается из клеёной, прочной древесины. Пропитывается биозащитными и огнезащитными материалами. Каркас обшивается влагостойкой фанерой или древесно-стружечными плитами. Стены и перекрытия заполняются различными видами утеплителей. Общая толщина стен, обычно, получается от 150 до 250 мм. Стены внутри обшиваются разными материалами. И отделываются по желанию. Снаружи возможен сайдинг, штукатурка, покраска, искусственный кирпич или камень и т. д.[8,9]

Панели изготавливаются на производстве. Тратится значительно меньше времени на возведение здания. Основные виды панельных домов:

- SIP панели
- панели нужной формы и размера
- Массивные деревянные панели.
- Панели SIP – трёхслойная монолитная конструкция, сэндвич-панель, пенополистирол, облицованный плитами OSB.

Массивные деревянные панели. Состоят из слоев досок. Слои перпендикулярны друг другу. Используются две основные технологии. По технологии CLT доски перекрестно склеены, а по технологии МНМ, перекрестно скрепляются алюминиевыми гвоздями, не представляющими в дальнейшем угрозы для различных режущих и обрабатывающих инструментов. Возможность изготовления изделий большой площади.

Модульные здания – изготовление на производстве блок-модулей, их монтаж производится непосредственно на строительной площадке. Возможна заводская установка окон, дверей, инженерных сетей, отопления и сантехники. Дальнейшим развитием этой темы является объёмно-модульное домостроение, где производство поставлено на поток и благодаря значительным объёмам строительства цена таких домов максимально снижается. Другие технологии строительства не основанные на

применении древесины, но рассмотренные, для сравнения, в этом исследовании :

Дома из кирпича плотного.

Дома из ячеистого пенобетона.

Дома, построенные по технологии несъемной опалубки.

Дома, построенные по технологии ЛСТК. ЛСТК - лёгкие стальные тонкостенные.

Дома построенные с использованием железобетона, как основного материала строительства.

После изучения состояния вопроса, для проведения более полного и достоверного анализа различных материалов ограждающих конструкций малоэтажного домостроения, было проведено разделение по следующим направлениям:

1. Свойства материалов ограждающих конструкций, влияющих на стоимость строительства в малом домостроении.
2. Свойства материалов ограждающих конструкций, влияющих на стоимость эксплуатации в малом домостроении.
3. Свойства материалов ограждающих конструкций, влияющих на комфорт и безопасность проживания в малом домостроении.

Учитывались не только свойства материалов, используемых при строительстве зданий, но и сопутствующие факторы, а также, некоторые особенности разных технологий, применяемых в малоэтажном строительстве. Анализ выполнен в виде таблиц и диаграмм, позволяющих наглядно сравнивать множественные значения различных технологий малоэтажного строительства.

Была поставлена задача, отследить большинство факторов, влияющих на стоимость строительства и последующего владения объектом малоэтажного строительства, на протяжении всего цикла строительства и эксплуатации здания. А также оценить некоторые критерии комфорта и безопасности проживания в домах, построенных по различным технологиям.

Подразумеваются равные условия по подключению коммуникаций, получения различной разрешительной документации и согласований.

В данной статье рассматриваются свойства материалов ограждающих конструкций, влияющих на стоимость эксплуатации в малом домостроении.

Таблица 1 - Свойства материалов, влияющих на стоимость эксплуатации в малоэтажном домостроении.

Свойства	Технология строительства										
	Кирпич (плотный)	Брус *9	Оцилиндрованное бревно *10	Клееный брус *9	SIP панели	Деревянные панели, массивные	Деревянный каркас (мин. вата)	Ячеистый пенобетон *5	Несъемная опалубка	ЛСТК *13	Железобетон 196
Теплопроводность Вт/(м·К)	0,6 – 0,8	0,2	0,15-0,18	0,1-0,16	0,04	0,1	0,056	0,38	0,036	0,048	1,69
Сопротивление теплопередаче (м ² ·°С/Вт) *2	0,592 *1 Недостаточно	0,587 недостаточно *8	0,73 недостаточно	0,8 недостаточно	3,95 *3 достаточно	0,8-1,5 *4 недостаточно	4,304 достаточно	0,14 недостаточно	2,9-4,5 достаточно	3-5 Достаточно *6	0,29 *10 недостаточно
Расходы на отопление	Высокие	средние	средние	средние	низкие	средние	низкие	средние	низкие	низкие	высокие
Расходы на вентиляцию	Высокие	Низкие	Низкие	Низкие	Высокие	Средние	Высокие	Высокие	Высокие	Высокие	Высокие
Паропроницаемость Мг/(м·ч·Па)	0,11	0,06	0,06	0,02	0,02	0,02	0,49-0,6 *7	0,11	0,02	0,3	0,03
Циклы морозостойкости	30-200	25-100	25-100	25-100	20-50	25-100	40	25-35	60	50	60
Долговечность (лет)	до 100	до 100	до 100	до 100	до 80	до 100	до 80	25-60	до 100		до 100
Устойчивость к грызунам [10]	Высокая	средняя	средняя	средняя	низкая	средняя	низкая	высокая	средняя	низкая	высокая
Устойчивость к повреждению микроорганизмами	Высокая	низкая	низкая	низкая	высокая	низкая	средняя	высокая	высокая	высокая	высокая
Устойчивость к насекомым	Высокая	низкая	низкая	средняя	высокая	средняя	средняя	высокая	высокая	высокая	высокая
Сейсмостойкость *11	Низкая	высокая	высокая	высокая	высокая	средняя	высокая	низкая	средняя	высокая	средняя
Водопоглощение (%) по массе	40	70-90	70-90	70-85	5-10	70-90	30-70	95	3-5	15	15-30
Устойчивость к наводнению *12 [5]	Высокая	средняя	средняя	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	высокая	средняя	высокая
Ремонтно-пригодность	Высокая	высокая	средняя	средняя	Низкая	средняя	средняя	высокая	средняя	высокая	высокая
Ветроустойчивость	Высокая	высокая	высокая	высокая	Низкая	высокая	средняя	высокая	высокая	Средняя	высокая
Стоимость утилизации *14	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая	средняя	Низкая	Низкая	высокая	высокая	Низкая	высокая

*1 – Толщина стены в 3 кирпича (79 см).

*2 – Необходимое сопротивление теплопередаче по СНиП, м² ·°С/Вт, Москва – 3,28

*3 – для утеплителя 150 мм.

*4 – Зависит от толщины панелей.

*5 – плотностью D600, в сухом состоянии

*6 – при толщине стен 150-250 мм.

*7 – минвата толщиной 200, 100, 50 мм.

*8 – толщина 150 мм.

*9 – ель, сосна, лиственница при влажности 8-12%.

*10 – при толщине стены 250 мм. И плотности 2500 кг/м²

*11 – при наличии надежного фундамента.

*12 – при наличии устойчивого фундамента, отсутствии сильного размывающего действия текущей воды, а также при непродолжительном воздействии.

*13 – при использовании утеплителя на основе минеральной ваты.

*14 – анализируется стоимость утилизации основного материала стен

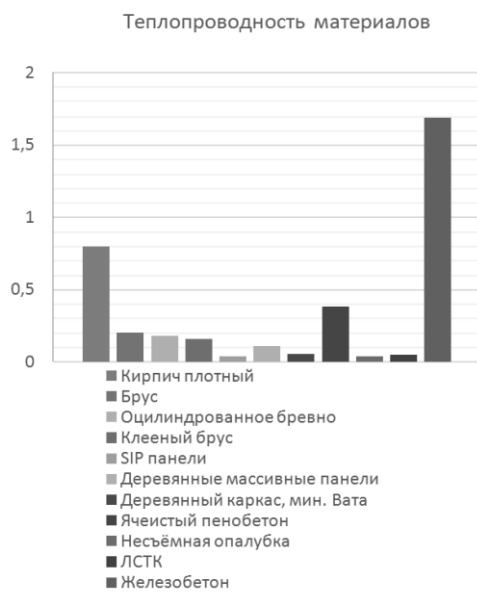


Рис. 1. Сравнение теплопроводности материалов ограждающих конструкций.

На рис. 1 видно, что минимальная теплопроводность достигается только в тех конструкциях, где в той или иной степени используется утеплитель.[2,6,7]

Расходы на отопление
(высокие, средние, низкие)

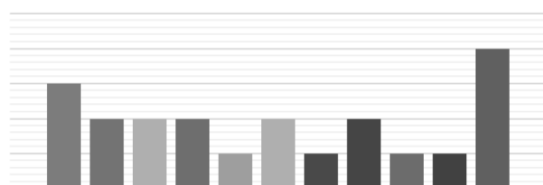


Рис. 2. Сравнение расходов на отопление при использовании различных технологий строительства.

Соответственно минимальные расходы на отопление также в тех конструкциях, где в той или иной степени используется утеплитель.

Достаточное сопротивление
теплопередаче
($m^2 \cdot ^\circ C / Bt$)

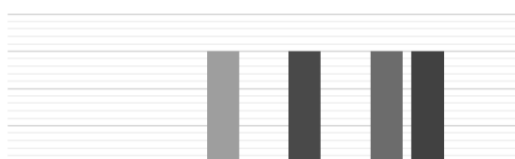


Рис. 3. Сравнение свойств материалов на сопротивлению теплопередаче. Необходимое сопротивление теплопередаче по СНиП, $m^2 \cdot ^\circ C / Bt$, Москва – 3,28[2]

Сейсмоустойчивость
(высокая, средняя, низкая)

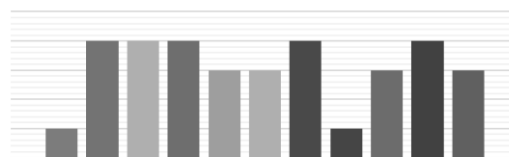


Рис. 4. Сравнение сейсмоустойчивости материалов ограждающих конструкций.[3,4]

Устойчивость к повреждению
микроорганизмами
(высокая, средняя, низкая)

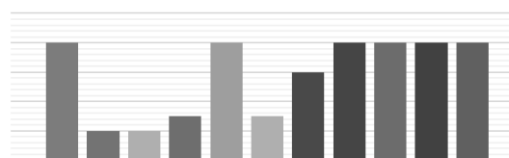
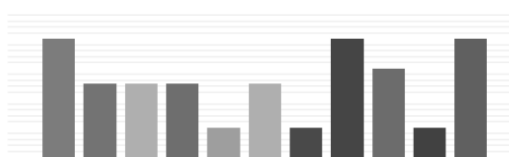


Рис. 5. Сравнение свойств устойчивости материалов ограждающих конструкций к повреждению грызунами. [10]

Как видно, по многим свойствам ограждающие конструкции с использованием древесины вполне конкурентоспособны, что позволяет делать выбор в их пользу, несмотря на наличие других традиционных и современных технологий.

Устойчивость к грызунам
(высокая, средняя, низкая)



Выводы

По результатам анализа свойств материалов, применяемых в различных технологиях малоэтажного домостроения, можно сделать вывод о значительных затратах тепловой энергии на отопление. Единственным способом снизить эти затраты является использование дополнительных материалов с высокими теплоизолирующими свойствами. Исключения составляют те технологии строительства, где основным материалом ограждающей конструкции уже является утеплитель. Например, каркасное строительство или технология SIP панелей.

1. По совокупности факторов, влияющих на стоимость эксплуатации зданий, построенных с использованием древесины, можно сделать вывод, что эти здания достаточно конкурентоспособны для массового использования.

2. Одним из способов снижения эксплуатационных и других расходов предлагается использовать модульную конструкцию дома, где основные помещения, так называемый жилой минимум, изготавливаются из более дорогих материалов, обладающих хорошими теплоизолирующими и экологическими свойствами, а остальные помещения из более дешёвых материалов, как предназначенные для сезонного проживания. Жилой минимум может меняться по составу и площади, в зависимости от потребностей и состава семьи. Разбивая дом на модули постоянного проживания и модули сезонного проживания, появляется возможность

значительно снизить затраты на строительство и эксплуатацию здания.

Литература

1. Официальный сайт проекта «Ваш Дом» [Электронный ресурс] / Официальный сайт. 2018-Режим доступа: http://www.vashdom.ru/articles/research_1.htm, свободный.
2. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с Изменением N 2)
3. Аварии в строительстве. Том 1. Причины аварий зданий и сооружений (В.В. Леденев) - 2014 год.
4. СП 14.13330.2011 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*
5. Субботин О.С. Характерные свойства наводнений и их влияние на формирование жилищ / О.С. Субботин // Жилищное строительство. – 2013. – № 8. – С. 36-40
6. Проектирование тепловой защиты зданий сп 23-101-2004
7. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М. Стройиздат, 1982.
8. Запруднов В.И., Стриженко В.В. Конструкции деревянных зданий. М. МНФРА - М – 2013 – 312-315 с.
9. Запруднов В.И., Стриженко В.В. Основы строительного дела: учебник для лесотехнических вузов. М. ГОУ ВПО МГУЛ. 2010. – 472-474с.
10. R.O. Baker, G.R.Bodman, R.M. Timm Rodent-proof construction and exclusion methods. Prevention and control of wildlife damage / University of Nebraska. – Lincoln, 1994.

©П.А. Угаров - магистрант ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана Мытищинский филиал, кафедры древесиноведения и технологии деревообработки, e-mail: m_2@rambler.ru; С.Н. Рыкунин - д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана Мытищинский филиал, кафедры древесиноведения и технологии деревообработки e-mail: rikunin@mgul.ac.ru; В.П. Суров – канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана Мытищинский филиал, кафедры древесиноведения и технологии деревообработки; e-mail: valery.surov@yandex.ru.

УДК 691.11

REGULARITIES OF THE FORMATION OF SURFACE CRACKS IN CYLINDRICAL LOGS

A. A. Lukash, N. P. Lukutsova

The article considers the regularities of formation of surface cracks in cylindrical logs. The production of these logs is a promising and useful because of useful output in their production is up to 80% and provide supportive and comfortable. We found that the lack of these logs are shrinkage and surface cracks generated during operation after installation is not dried logs in the logs. It is shown that cracks impair the appearance and durability of wooden houses due to the wicking in them of atmospheric moisture. It is proved that the cracking is due to uneven-dimensional drying of outer and inner layers of logs. Set numerical values of the stresses over the cross section of logs. It is proved that the drying of the outer and inner layers of logs through the early drilled longitudinal hole technology will eliminate the formation of surface cracks in cylindrical logs.

Keywords: logs, surface cracks, drying, stress

В статье рассмотрены закономерности образования поверхностных трещин в оцилиндрованных бревнах. Производство этих бревен перспективно и целесообразно, т.к. полезный выход при их изготовлении составляет до 80% и обеспечиваются благоприятные и комфортные условия проживания. Выявлено, что недостатком этих бревен являются усадка и поверхностные трещины, образующиеся в процессе эксплуатации после установки не высушенных бревен в сруб. Показано, что трещины ухудшают внешний вид и продолжительность срока службы деревянных домов из-за затекания в них атмосферной влаги. Доказано, что появление трещин связано с неравномерной сушкой наружных и внутренних слоев бревен. Установлены численные значения напряжений по сечению бревен. Обосновано, что сушка наружных и внутренних слоев бревен через ранее высверленное продольное технологическое отверстие устраним образование поверхностных трещин в оцилиндрованных бревнах.

Ключевые слова: оцилиндрованное бревно, поверхностные трещины, сушка, напряжения

Introduction

One of the priorities of the state program "Affordable and com-Portabello housing to citizens of Russia" is a full-scale development de-Ivanovo construction and necessary materials and wood products. One of the conditions of its implementation is the creation of high-performance materials [1]. Therefore, studies on improvement of materials for wooden housing construction is significant, and meaningful.

Currently actively developing green building - construction and operation of buildings impact on the environment is minimal [2]. Green building is being promoted in the developed world and including in Russia. The significant-ing a part of the natural raw material could be replaced by renewable raw materials. Wood as the most environmentally friendly materi-al, created by nature, has a number of unique properties that allow the adoption to expect that this type of housing is best suited for human habitation [3, 4].

Wood, having a very low conductivity reduces heating costs, keeping winter heat inside the house, and in summer preventing its penetration from outside, so in wooden houses always observed optimum temperature. Wood is the most

environmentally friendly building material, which provide comfortable conditions of service. Wooden housing construction is the most promising direction of housing due to low prices, fast of construction and high quality of these houses and the versatility of the technology. The production of houses made of logs the most promising because provided the high useful output – up to 80% [4]. Despite the obvious advantages of houses made of logs, there are problems in their production and operation.

The quality of the logs is dependent on the defects structure of wood and precision manufacturing [5]. Weaknesses that reduce the quality indicators of the houses from round timber is shrinkage, component 5-7% of the height of the framework [4] and surface cracks (Fig.1).

For the production of round logs used freshly cut wood of the raised humidity. Drying of logs is assembled in the frame. Over time the logs appear superficial radial cracks. In the process of exploitation cracks in flows of atmospheric moisture, which leads to a reduction of lifetime homes. Besides unseasoned logs before they are installed due to the lack of a protective layer during the first years of use, will actively allocate the

moisture in the natural drying. To eliminate the appearance of external cracks by cutting out the compensation groove along the length of the log is not the right solution. The crack propagates along the groove, reducing the strength of the beam. In addition, the use of wet wood is fraught with rotting wood. It is obvious that it is necessary to prohibit the construction of houses is not dried prior to use by operational humidity of wood. Development of efficient methods for the drying of round wood of large diameter is not possible without you-clarified the mechanism of formation of surface cracks. Therefore, studies have been conducted establishing the causes of formation of cracks on the surface of the timber when it dries, the calculated stresses in the tree blue and the size of the cracks.



Fig. 1. Surface cracks

Therefore, the aim of the research is us-the establishment of the formation of superficial cracks and how they are eliminated, the. Scientific novelty are the patterns of distribution of surface tre women into cylindrical logs. The theoretical significance lies in the substantiation-NII numerical method of determining parameters of surface cracks. Practical significance – justification of measures to prevent surface cracks.

Methods and materials

The methodological basis is the me-ODS of analysis of the physico-mechanical and ex-operational characteristics of materials and products from wood. Theoretical basis of research are the main provisions of the theory of strength of wood. The empirical basis of the study was the physico-mechanical properties of wood – tensile strength tensile modulus of elasticity. For research was used round timber used in the manufacture of round logs.

Research result

Round logs may have a length of 6 meters or more. The process of removing moisture occurs at the end of the logs along the fiber-con. But given the great length of the log can be considered that the main part of the log the movement of moisture occurs in the radial direction from the center to the periphery. Drying initially dry the outer layers. The inner layers due to the large thickness of the log dries much slower than the outer layers. When moisture decrease from the initial to 30% shrinkage (size reduction) does not occur. On the downside, humidity less than 30% bound moisture is removed and the wood reduces its size [6].

Assume that the cross section of logs consists of n elementary layers (rings) of a thickness b , where $b = r/n$. In Fig. 2 shows a diagram of the conventional separation of the cross section rounded log into finite elements (rings).

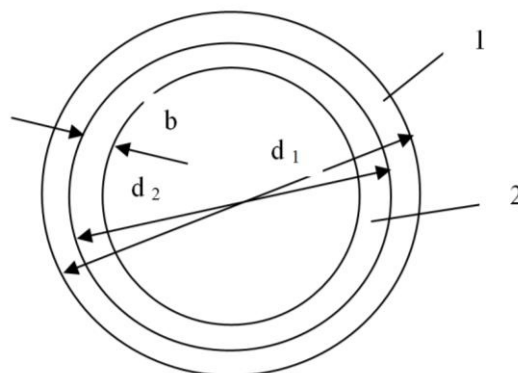


Fig. 2. Scheme of conventional fission cross section of logs into elementary layers

As is known, the drying process is accompanied by a decrease in linear dimensions after the reduction of moisture content from initial to operational. Calculate the length of each of the elementary layers before and after drying, taking into account factors tangentially (K_T) and radial shrinkage (K_p).

The length of the first elementary layer before drying was

$$L_{B1} = \pi d,$$

where d – the diameter of the basic layer, mm.

For the first elementary layer, the diameter is equal to the diameter of the log. The length of the first finite element L_{C1} , mm, after drying, taking into account the coefficients of the radial (K_p) and tangentially shrinkage (K_T) made up

$$L_{C1} = \pi d (1 - K_p) (1 - K_T). \quad (1)$$

When drying the length of the first elementary layer decreased (deformed) by the amount

$$\varepsilon_1 = L_{B1} - L_{C1} = \pi d - (1 - K_p) (1 - K_T) \pi d = \pi d [1 - (1 - K_p) (1 - K_T)]. \quad (2)$$

The length of the second finite element L_{B2} , mm, before the drying was

$$L_{B2} = \pi(d - 2b).$$

The length of the second elementary layer L_{C1} , mm, after drying, taking into account the coefficient of shrinkage tangentially K_T made

$$L_{C1} = \pi(d - 2(1 - K_p)b)(1 - K_T).$$

When drying the length of the second elementary layer decreased (deformed) by the amount

$$\varepsilon_2 = L_{B2} - L_{C2} = [\pi(d - 2b)] - [\pi(d - 2b(1 - K_p))(1 - K_T)].$$

In the General case, the deformation of each of the n -th elementary layer decrease in the length of a given ε , mm, will be

$$\varepsilon_n = [\pi(d - 2bn)] - [\pi(d - 2bn(1 - K_p))(1 - K_T)]. \quad (3)$$

The changing length of the elementary speew you zvano stresses that occur in the course of drying. As is known, the modulus of elasticity E characterizes the ability of a material to de-form under the action of external forces [6] and is expressed as follows

$$E = \sigma/\varepsilon, \quad (4)$$

where σ – is the stress,
 ε – deformation.

If the stress value exceeds the tensile strength across the grain, it is the destruction of the elementary layer, i.e. the formation of cracks, and the value of ε is essentially the width of the crack. Expected melt tension and the width of cracks in the pine round log with an initial diameter of $d = 220$ mm, the thickness of each finite element accept 5 mm tangentially Coefficient of shrinkage for a wood of pine is 0.07 [3]. Shrinkage of the logs makes from 5 to 7%. We co-factor radial shrinkage $K_p = 0,06$. Substituting the original data in the expression (3) it is possible to find the deformation in each finite element, which, in fact, equal to surface cracks. After the deformation analysis according to (4) determine the magnitude of the

stresses generated under the action of deformations. The results of the calculations are given in table. 1.

The modulus of elasticity of pine in the tangential direction is 90 MPa [7]. So you can find tension that cause the stretching of the conditions (4)

$$\sigma = E \varepsilon.$$

The strength of the wood across the grain with humidity over 30% is 2.4 MPa [7].

The values element-by-element calculation of stresses and strains listed in the table. 1.

From table 1 shows that in 6 of the elementary layer (with a diameter less than 170 mm) the tensile stresses do not exceed the limit of tensile strength across the grain, ie, cracking does not occur.

Table 1 - The magnitude of strains and stresses in layers rounded log

№ basic layer	Diameter layer, mm	Deforma tion, mm	Stress, MPa
1	220	83	7,47
2	210	40,5	3,64
3	200	33,9	3,05
4	190	32,6	2,93
5	180	28,6	2,57
6	170	24,7	2,21
7	160	20,7	1,86
8	150	16,8	1,51
9	140	12,8	1,15
10	130	9	0,8
11	120	4,9	0,44
12	110	1	0,09

The existing methods of drying thick logs are not perfect: vacuum drying chamber roads and energy consuming and therefore not practically used. Drying can be done in other ways [8]. Atmospheric drying or drying in the open air under a canopy is simple and DOS topnote. But this process is very slow – from several months to several years.

One of the ways to increase the speed of drying logs without cracking is the implementation of longitudinal holes [9, 10]. This method will provide uniform drying of the outer and inner layers. In the studies [12] substantiates the parameters of round logs with a longitudinal hole, which provides the necessary strength of the walling. From the graph shown in Fig. 3, it was found that when the hole diameter of 60 mm, provided the permissible load $Q = 8.8$ kN/m.

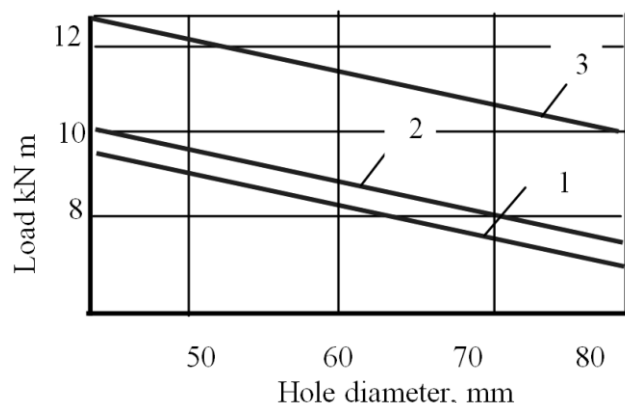


Fig. 3. Load dependence on diameter openings: 1– spruce; 2–pine; 3–aspen

For Fig. 4 shows a cross section of logs with a diameter d_0 and diameter of hole d_6 .

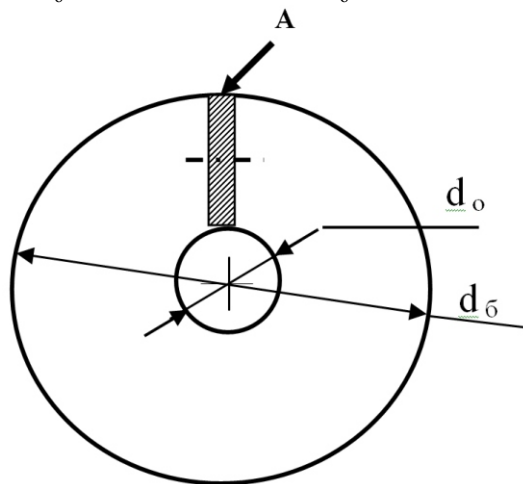


Fig. 4. Cross section of a log with a hole for drying

With the simultaneous supply of the drying agent from the outside and in the hole logs providing uniformity of drying of the outer and inner layers. For the logs the most common diameter of 220 mm with a hole diameter of 60 mm thickness of the dried layer A (see Fig. 4) will be $220 - 60 = 160$ mm.

The conditions of drying of a log with a hole similar to the conditions of drying of logs with a diameter of 160 mm without hole.

In table. 1 shows that for diameters less than 170 mm voltage drying less than allowable tensile stresses. Therefore, the simultaneous drying of outer and inner layers of round logs with a longitudinal hole technology will ensure the elimination of surface cracks.

Conclusion

1. Application in the construction of round logs is reasonable from a technological point of

view (useful output represented up to 80%) and ensure comfortable living conditions.

2. Surface cracks impair the appearance and durability of wooden houses due to the wicking in them of atmospheric moisture.

3. The cracking is due to uneven drying of the outer and inner layers of the logs, which confirms the proposed method determining the numerical values of the stresses over the cross section of logs.

4. Drying of outer and inner layers of logs through the early drilled longitudinal hole technology will eliminate the formation of surface cracks in cylindrical logs.

Literature

1. Development strategy for the forest complex of the Russian Federation for the period until 2020, approved by Order of Ministry of industry and trade and Ministry of agriculture of 31 October 2008 № 248/482.
2. Lukash A. A. The concept of creation of new building materials from wood // Materials of the X International scientific and practical conference, «Scientific horizons», – 2014. Volume 11. Technical sciences. Mathematics. Physics. Construction and architecture. Sheffield. Science and education LTD – 96 p.
3. Lukash, A. A. Improvement of environmental safety of composite building materials-wood / A. A. Lukash, N. P. Lukutsova // Bulletin Of Belgorod. GOV't. tekhnol. UN-TA im. V. G. Shukhov, 2016. No. 8. pp. 37-41.
4. Lukash, A. A. The House from round logs: production prospects, shortcomings and ways of their elimination / A. A. Lukash, E. S. Grishina // Builds. materials. – 2013- №4, pp. 109-110.
5. Romanov, V. A., Software Development for statistical quality control of technological process/ Romanov V. A., Pruss, B. N.// Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and technical Sciences. 2017. No. 7-8. pp.71-75.
6. Ugolev, B. N. Drivelinemediia basis-mi forest commodity science: uchebn. for universities. Ed. 3–e, Rev. and supplementary /B. N. Ugolev.- M. MSFU, 2007.-340 p.
7. Borovikov, A. M. Handbook of driesi-A. M. Borovikov, B. N. Ugolev.- M.: Forest industry, 1989. – 296 p.
8. Rusev, A. I. Drying of wood / A. I. Rusev. – M.: Publishing House Of DOE, 2010. – 418 p.
9. Lukash, A. A. Intensification of process of drying of round logs /A. A. Lukash, E. S. Grishina // Lesnoy journal.– 2014.– No. 2.– pp. 86-93.

10. Lukash, A. A. the Control of the drying process round logs/ A.A. Lukash // improving the efficiency of processes and devices in chemical and allied industries: collection of scientific papers]. scientific.-tekhn. Conf. place of work. 105-th anniversary of A. N. Planovskoe. Vol. 2 / Moscow: FSBEI MSUDT, 2016. – pp. 244-247.

11. Lukash A. A. New building materials and wood products: monograph /A. A. Lukash, N. P. Lukutsova. – M: Publishing house ASV, 2015. – 288 p.

12. Serpik I. N. The analysis of deformation relief formation of plywood / I. N. Serpik, A.A. Alekseyev, A. A. Lukash //Builds. materials. – 2012. – No. 12. – pp. 31–33.

©A. A. Lukash - PhD, associate Professor of Department of Technology of Wood treatment Bryansk state engineering-University of technology, e-mail: mr.luckasch@yandex.ru; N. P. Lukutsova – doctor of science in technology, full professor of Department of Production conctuctional materials, Bryansk state engineering, University of technology, Bryansk, email; natluk58@mail.ru

©А. А. Лукаш – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии деревообработки, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», e-mail: mr.luckasch@yandex.ru; Н. П. Лукутцова – д-р техн. наук, профессор кафедры производства строительных конструкций, email; natluk58@mail.ru, ФГБОУ ВО «БГИТУ».

UDK 674.81

STUDIES ON THE PELLETING OF WOOD BASED MATERIALS

Zotán Kocsis, Etele Csanády

One of the most common ways of handling wood-based dust-chips waste is their compaction into pellets. The pressure used at pellet making is typically between 100 to 150 MPa. In the compaction process the bulk density (pellet density) and the modulus of elasticity also grow rapidly. The energy used during pelleting significantly determines the product's market position and competitiveness. Pressure energy depends on a number of influencing factors, which require more in-depth research. In this research report, we have attempted to find the major influencing factors related to the use of energy in the pellet making process. During the experiments we investigated different wood species and particle size distributions using different pressures, pellet diameters and temperatures in relation to pellet density and compression energy. We found a general correlation among the large number of variables, which was greatly simplified by the application of the dimensional analysis method. The validity of the similarity criterion equation obtained by this method was proved experimentally and the results showed good correlation.

Keywords: pelleting, compression work, dimensional analysis, particle size distribution, similarity equation.

Одним из наиболее распространенных способов обработки древесно-стружечных отходов является их уплотнение в гранулы. Давление, используемое при изготовлении гранул, обычно составляет от 100 до 150 МПа. В процессе уплотнения объемная плотность (плотность гранул) и модуль упругости также быстро растут. Энергия, используемая при гранулировании, значительно определяет рыночную позицию и конкурентоспособность продукта. Энергия давления зависит от ряда влияющих факторов, которые требуют более глубоких исследований. В этом исследовании мы попытались найти основные влияющие факторы, связанные с использованием энергии в процессе изготовления гранул. Во время экспериментов мы исследовали различные виды древесины и распределения частиц по размерам с использованием разных давлений, диаметров гранул и температур в зависимости от плотности гранул и энергии сжатия. Мы нашли общую корреляцию между большим числом переменных, что было значительно упрощено применением метода пространственного анализа. Достоверность сходных критериев равенства, полученных этим методом, были доказаны экспериментально и результаты показали хорошо выраженную корреляцию.

Ключевые слова: гранулирование, компрессионные работы, размерный анализ, распределение частиц по размерам, уравнение подобия.

Introduction

Pelletizing is one of the rational uses of waste products generated in the wood industry. During the pelletizing process, the volume of the material decreases considerably, which facilitates transport, handling and storage, and gives an energy source with higher energy density. In order to increase the competitiveness of pellets, an important question is to optimize the energy consumption as a function of system variables. The most commonly used pellet presses are constructed in the form of a die ring and the properly prepared material is pressed into the boreholes of the ring. At pelleting, part of the introduced energy is consumed by friction forces on the wall of the boreholes and turned into heat. This heat may rise the temperature of the die up to around 80 to 90°C (Kocsis, 2015). The first comprehensive analysis of the mechanics of pelletizing can be found in the work of Schwanghart. Schwanghart (1969) attempted to determine the pressure conditions under the compression rolls and set up a relatively simple empirical relationship. In addition, he investigated the change in energy consumption of compression when pelletizing fodder flour.

For the description of compression process for viscoelastic materials, nonlinear rheological models are used, in which the plastic deformation is also taken into account (Sitkei, 1994; Sitkei, 1997). However, the theories we have available do not yet give any general relationship between material properties and pressing energy demand.

The purpose of present research work is to establish a relationship among the variables that influence the compression process, such as compression pressure, temperature, particle size, pellet diameter, pellet density, specific energy and material properties.

Due to the higher number of variables for this purpose the application of the similarity equation appeared to be the most promising method, the detailed discussion of which is part of the dimensional analysis (Buckingham, 1914). The method has been successfully used for solving heat transfer and flow problems over the past 100 years. But it can also be used in the other fields of technical sciences.

Theoretical considerations

Wood is a complicated structure of biomechanical systems, so the exact mathematical description of the compression process is not yet sufficiently elaborated, and at present only semi-

empirical, empirical approaches are spread ing. This is particularly true for pelleting where a significant volume change occurs during the compaction process. It follows that the stress-deformation (σ - ε) relationship is always strongly non-linear. When pelleting, the resistance the compaction in the compression channel (borehole) is strongly related to the properties of the material to be compressed, which may be characterized by the compression strength as a first approximation. When describing the compression process, the most important influencing factors, such as the material (wood species), particle size distribution, compaction pressure, temperature, pellet diameter, pellet density, and full compression work are to be treated. There are some other factors influencing the process, but their effect on the whole compaction is not so significant. Such are the compaction velocity and the moisture content of the initial material. Pressing speed is a technological feature that determines productivity. This speed is constant and generally can not be varied during pelleting. Moisture content is also an important production parameter, but its range is limited (optimally 10-12%), due to technological requirements such as density and durability.

Taking into account the above, the following formal functional relationship can be described for the specific energy consumption:

$$W = f(p, \gamma, d, \sigma_c, \vartheta, \vartheta_0) \quad (1)$$

where:

p – pressure, N/m²,

W – total specific energy of compaction, Nm/m³,

γ – final specific weight of the pellet, N/m³,

d – diameter of the pellet, m,

σ_c – compressive strength of the wood, N/m²,

ϑ, ϑ_0 – are the pellet temperature and a reference

temperature, here taken as $\vartheta_0 = 25^\circ\text{C}$ (room temperature).

In order to derive the proper functional form of Eq. (1), the standard dimensional analysis method was used (Buckingham, 1914; Langhaar, 1951). It yields the following dimensionless numbers

$$\pi_1 = \frac{W}{p}; \quad \pi_2 = \frac{\gamma \cdot d}{\sigma_c}; \quad \pi_3 = \frac{\vartheta}{\vartheta_0}$$

and according to Buckingham's theorem, we may further write

$$\frac{W}{p} = f\left(\frac{\gamma \cdot d}{\sigma_c}, \frac{g}{g_0}\right)$$

or

$$\frac{W}{p} = \text{const} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot d}{\sigma_c}\right)^n \cdot \left(\frac{g}{g_0}\right)^m \quad (2)$$

where the constant and the exponents n and m should be determined experimentally.

In the above equation the dependent variable is the specific energy consumption W , therefore, the dimensionless number π_1 containing the specific energy is placed on the left side of Eq.(2). The other two numbers containing only independent variables are on the right side of Eq.(2). The total work of compaction is determined by the pure compression work and by the work done during pushing out the pellet from the boreholes. The pure compression work is given by integration of the pressure along the displacement. The pressure – strain relationship is strongly non-linear and can be given in the following form (Sitkei, 1994; Carlos et. al, 2010):

$$p = A \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^n \quad (3)$$

where:

A – material dependent constant,

ε – strain,*

n – exponent.

The exponent n is depending on the size and strength of particles and on the pressure range. Its value varies between 1.5 and 2.5 for various wood chips (Sitkei, 1994; Hofko, 2008). Especially the strength of chips influences the course of compaction curve as a function of displacement. Soft particles can be compacted at relatively low pressures and, increasing further the pressure, the curve ascends steep giving a higher exponent. On the contrary, particles of hardwood species with higher individual strength will be compacted more uniformly as a function of displacement resulting in lower exponent n . Due to the anatomical structure of wood, the individual strength of particles depends not only on wood species but also on the size of particles. With decreasing particle size the surface – volume ratio increases (Csanády and Magoss, 2013; Akdeniz and Haghighat, 2013). The surface of

a particle is created by fracture with highly uneven surface and the load-bearing capacity of this near-surface layer is less compared to that of the sound inner part. As a consequence, a smaller particle may behave similarly as it would be originated from a softer wood species. The size effect on the compaction process can only be determined experimentally.

The second main part of the total compaction work is the work done during the push-out of the pellet from the boreholes. This work depends on the friction coefficient between pellet and channel wall, the length of the channel and the elastic-plastic behavior of the material at the given pressure. This work should also be determined experimentally.

Concerning constant deformation velocity, the particular phases of a compaction process is illustrated in Fig.1. Due to the constant deformation rate, the pressure progressively increases. During constant load or stress, the deformation and compaction continues to grow (creep). After unloading the elastic part of the deformation recovers suddenly following by a retarded rebound. Much of the deformation is retained as permanent deformation ensuring the required pellet density.

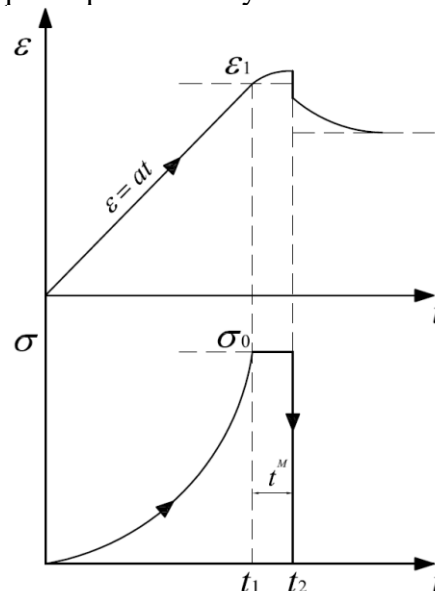


Fig. 1. The time course of the compression process (Sitkei, 1994)

Materials and methods

The quality requirements of the pellet are stipulated in European standard EN 14961-2:2011. This standard includes the optimum diameter of the

pellet (6 mm) and the length (20-30 mm). In the course of the research, experiments were carried out with 6 mm, 8 mm and 16 mm diameter and 115 mm compression duct lengths, allowing the production of pellets of the same size as the industrial practice. Measurements were performed in closed space using the INSTRON Universal Testing Machine (Fig. 2/a). The compression speed was constant with 10 mm/min, which is more or less in agreement with the actual production conditions. The compaction pressure varied from 100 to 140 MPa. The compression channel was heated using a unique temperature controller and measuring system (Fig.



Fig. 2. Punch and the temperature control and measurement system

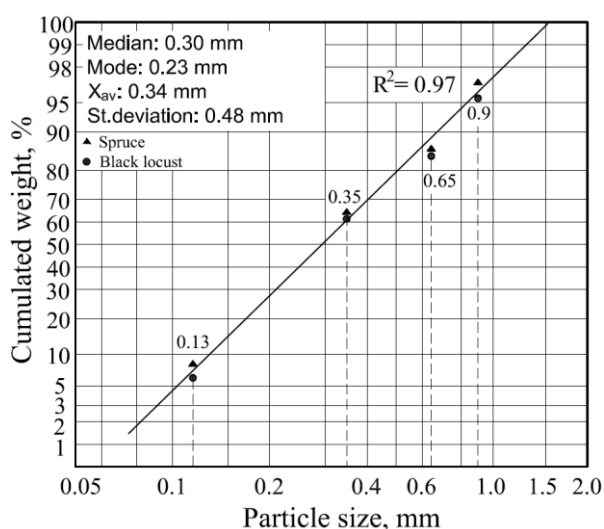


Fig. 3. The particle size distribution on probability net

From Figure 3, it can be seen that the dominant fractions ($\sim 60\%$), which are characteristic for re-chopping, are in the range of 0.2 to 0.5 mm. The characteristic parameters of the distribution are as follows: *Median* = 0.3 mm, *Mode* = 0.23 mm, geometric mean X_{av} = 0.34 mm and the standard deviation σ = 0.48 mm. When compressed, the anatomical properties of the wood also affect the elastic and plastic behavior of the dust-chips, in particular the relative residual

2/b). Measurements were made on spruce (*Picea abies*) and black locust (*Robinia pseudoacacia*) samples with 10-12% moisture content. The initial fractions were broken into fine fraction a sieve with using electromagnetic shaking apparatus and a 10 minute sieve time. The vibration amplitude was 1.5 mm and the fractions of 0.063-0.2 mm; 0.2-0.5 mm; 0.5-0.8 mm and 0.8-1.0 mm were obtained. Figure 3 shows the integral curve of the log-normal distribution of spruce and black locust fractions on probability net. The mean values obtained during the screening were recorded in the fraction intervals (Fig. 3, dotted lines).

deformation and the relative rebound. The latter two determine the final density of the pellet.

Result and discussion

Figure 4 shows the total specific work for spruce chips for different pellet diameters using 140 MPa pressure. With increasing diameters the relative contribution of wall friction decreases and therefore the energy requirement also decreases.

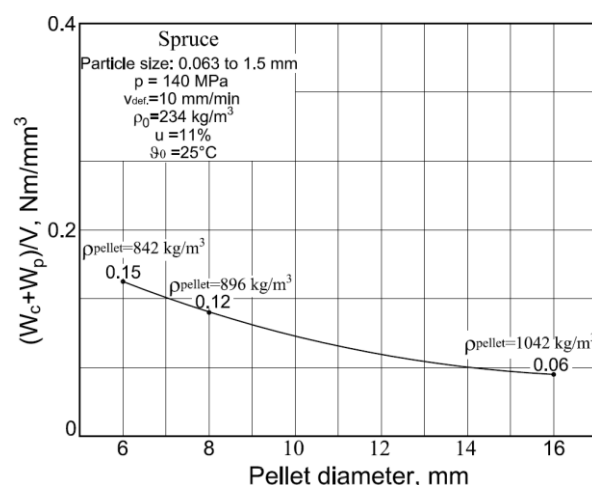


Fig. 4. The change in specific work depending on the diameter of spruce pellets at ambient temperature

Due to increasing compression temperature, the thermoplastic behavior of wood-based materials

is enhanced resulting in higher residual deformation. Figure 5 shows the effect of pellet temperature on the total specific compaction energy.

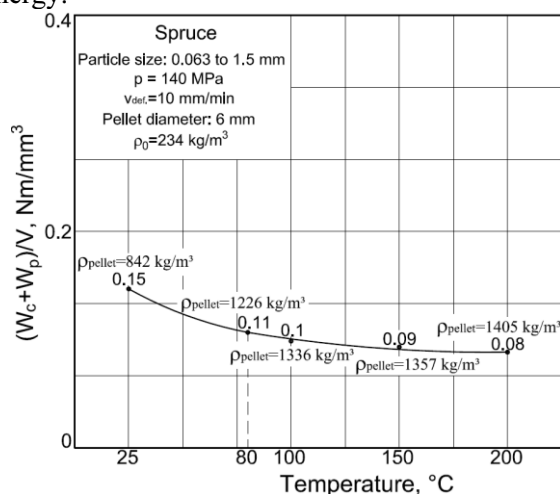


Fig. 5. The change of total specific work depending on pellet temperature using spruce chips

The beneficial effect of heating is more efficient, however only up to 100 to 110°C, further increase of temperature reduces the energy requirement in a lesser extent. A possible explanation for this may be the reduction in friction coefficient between particles and in the virtual viscosity of the material as the temperature increases. Due to the limiting effect of solid wood density on the compaction process, however, the compaction is an asymptotic phenomenon with decreasing effectivity toward high densities. An inspection of Fig. 5 and Fig. 7 clearly shows that the pellet density over 100°C is not far from the solid wood density (~ 1580 kg/m³). It should also be remembered that the pellet density, due to the rebound, is always less than the compaction density at maximum pressure. Similar measurement results are depicted in Figure 6 and 7 for black locust.

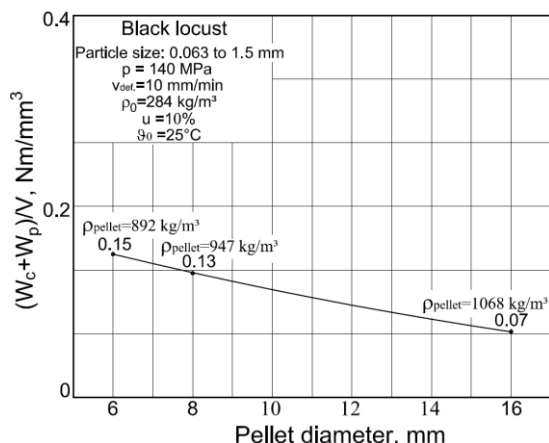


Fig. 6. The change in specific work as a function the punch diameter using black locust samples

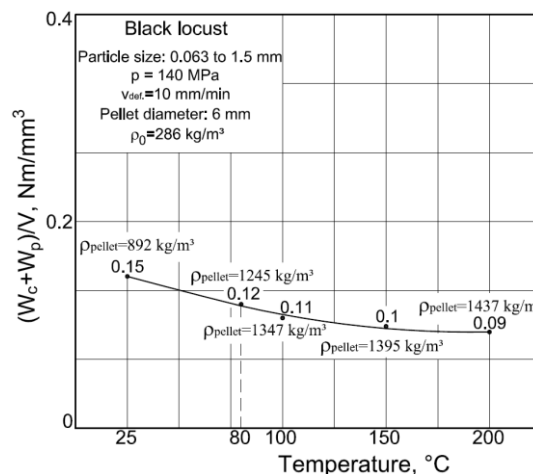


Fig. 7. The change in the specific work as a function of temperature using black locust chips

It is interesting to note that the total energy values of compaction for black locust only slightly differ from those of the spruce although the components are not the same. In order to calculate the dimensionless numbers the compressive strength of the wood species used are needed. In general this value varies for spruce in the range of 45 to 55 N/mm² and for black locust 60 to 65 N/mm² (Molnár, 1999). It should be noted, however, that the strength ratio for small particles is not exactly the same as for the solid wood. Therefore, a slight correction might be required. The measured and calculated values for spruce and black locust are summarized in Table 1.

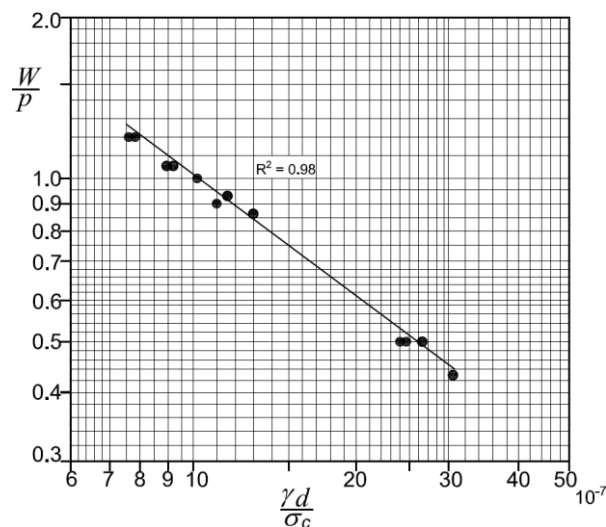


Fig. 8. Dimensionless plot of experimental results for 25°C temperature

Plotting the dimensionless numbers has revealed that in our case the selection of compressive strength values of 55 and 65 N/mm² for spruce and black locust respectively is appropriate and all measurement points are on the same line as shown in Fig. 8.

Table 1 - Summary of research findings in the 100 and 140 MPa pressure range for pellets with particle size from 0.063 to 1.0 mm at 25°C

Species	Pressure	Specific energy W (Nm/mm ³)	Specific energy W (Nm/m ³)	W/p	Pellet specific gravity	Pellet diameter	σ_c (N/m ²)	$\gamma d / \sigma_c$
	p (N/m ²)				γ (N/m ³)	d (m)		
black locust	1,4.10 ⁸	0,15	1,5.10 ⁸	1,07	8920	0,006	65.10 ⁶	8,93.10⁻⁷
	1,4.10 ⁸	0,13	1,3.10 ⁸	0,93	9470	0,008	65.10 ⁶	11,65.10⁻⁷
	1,4.10 ⁸	0,07	0,7.10 ⁸	0,50	10680	0,016	65.10 ⁶	26,28.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,12	1,2.10 ⁸	1,20	8130	0,006	65.10 ⁶	7,50.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,10	1,0.10 ⁸	1,00	8340	0,008	65.10 ⁶	10,26.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,05	0,5.10 ⁸	0,50	9720	0,016	65.10 ⁶	23,92.10⁻⁷
spruce	1,4.10 ⁸	0,15	1,5.10 ⁸	1,07	8420	0,006	55.10 ⁶	9,18.10⁻⁷
	1,4.10 ⁸	0,12	1,2.10 ⁸	0,86	8960	0,008	55.10 ⁶	13,03.10⁻⁷
	1,4.10 ⁸	0,06	0,6.10 ⁸	0,43	10420	0,016	55.10 ⁶	30,31.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,12	1,2.10 ⁸	1,20	7030	0,006	55.10 ⁶	7,67.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,09	0,9.10 ⁸	0,90	7500	0,008	55.10 ⁶	10,90.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,05	0,5.10 ⁸	0,50	8450	0,016	55.10 ⁶	24,58.10⁻⁷

In the next step, the effect of temperature on the compression work spruce and black locust chip samples at pressures of 100 and 140 MPa. The

results are summarized in Table 2. Figure 9 shows the dimensionless graphical representation of experimental results.

Table 2 - Summary of measured and calculated results at 100 and 140 MPa, particle size 0.063 to 1.0 mm with the effect of temperature

Species	Pressure	Specific energy W (Nm/mm ³)	Specific energy W (Nm/m ³)	W/p	Pellet specific gravity	Pellet diameter	σ_c (N/m ²)	$(\frac{\gamma d}{\sigma_c})(\frac{\vartheta}{\vartheta_0})^{0,15}$
	p (N/m ²)				γ (N/m ³)	d (m)		
black locust	1,4.10 ⁸	0,12	1,2.10 ⁸	0,86	12450	0,006	65.10 ⁶	13,67.10⁻⁷
	1,4.10 ⁸	0,11	1,1.10 ⁸	0,79	13470	0,006	65.10 ⁶	15,29.10⁻⁷
	1,4.10 ⁸	0,10	1,0.10 ⁸	0,71	13950	0,006	65.10 ⁶	16,74.10⁻⁷
	1,4.10 ⁸	0,09	0,9.10 ⁸	0,64	14370	0,006	65.10 ⁶	18,04.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,09	0,9.10 ⁸	0,90	11200	0,006	65.10 ⁶	12,30.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,08	0,8.10 ⁸	0,80	11960	0,006	65.10 ⁶	13,58.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,07	0,7.10 ⁸	0,70	12870	0,006	65.10 ⁶	15,44.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,07	0,7.10 ⁸	0,70	13110	0,006	65.10 ⁶	16,46.10⁻⁷
spruce	1,4.10 ⁸	0,11	1,1.10 ⁸	0,79	12260	0,006	55.10 ⁶	15,91.10⁻⁷
	1,4.10 ⁸	0,10	1,0.10 ⁸	0,71	13360	0,006	55.10 ⁶	17,92.10⁻⁷
	1,4.10 ⁸	0,09	0,9.10 ⁸	0,64	13570	0,006	55.10 ⁶	19,24.10⁻⁷
	1,4.10 ⁸	0,08	0,8.10 ⁸	0,57	14050	0,006	55.10 ⁶	20,84.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,09	0,9.10 ⁸	0,90	10520	0,006	55.10 ⁶	13,65.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,08	0,8.10 ⁸	0,80	11100	0,006	55.10 ⁶	14,89.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,07	0,7.10 ⁸	0,70	12360	0,006	55.10 ⁶	17,53.10⁻⁷
	1,0.10 ⁸	0,06	0,6.10 ⁸	0,60	12860	0,006	55.10 ⁶	19,08.10⁻⁷

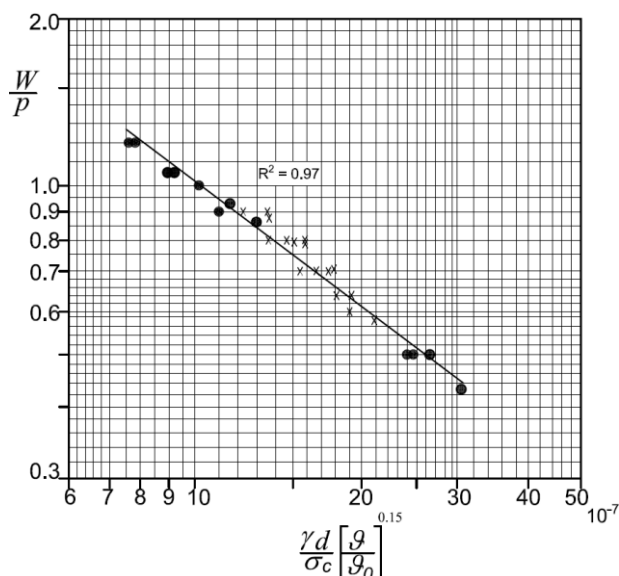


Fig. 9. Measurement points including also those for heated pellets

The exponent m in Eq.(2) should be determined such that the measured points for different pellet temperatures fit the same line properly as given in Fig. 8. Taking $m = 0.15$, all measurement points including also those for heated pellets fit the straight line as shown in Figure 9. Results with elevated temperatures are indicated by x in the figure.

The scattering zone of measurement points is fully acceptable and it corresponds to a good engineering accuracy. The calculated correlation coefficient is around 0.97.

In the following the effect of particle size on the compression work was examined. For these experiments we have used three fractions of chips for both spruce and black locust. The fractions have the following particle ranges: 0.063 to 0.2 mm, 0.2 to 0.5 mm and 0.8 to 1.0 mm. The measurement data are summarized in Table 3. The measurement and calculated results are plotted in Figure 10 and

11. It is clearly seen that in both cases the energy requirement changes in a very low extent, although the slight decrease for both wood species has the same tendency. If we use now these additional data in the similarity equation without any correction and plot quite similarly to Figure 8 and 9, we obtain Figure 12 including all measurement points.

The scattering of data points are not much higher and the correlation coefficient also in this case is as high as 0.94. This is due also to the fact that for construction of Figure 8 and 9 the middle fraction from the three was used and therefore, the points of the other two fractions are placed on the opposite sides of the resultant straight line. The final similarity equation is given in the following form:

$$\frac{W}{p} = C \cdot \left(\frac{\gamma \cdot d}{\sigma_c} \right)^{-0.75} \cdot \left(\frac{g}{g_0} \right)^{0.15} \quad (4)$$

where the constant C has the value of $3.12 \cdot 10^{-5}$

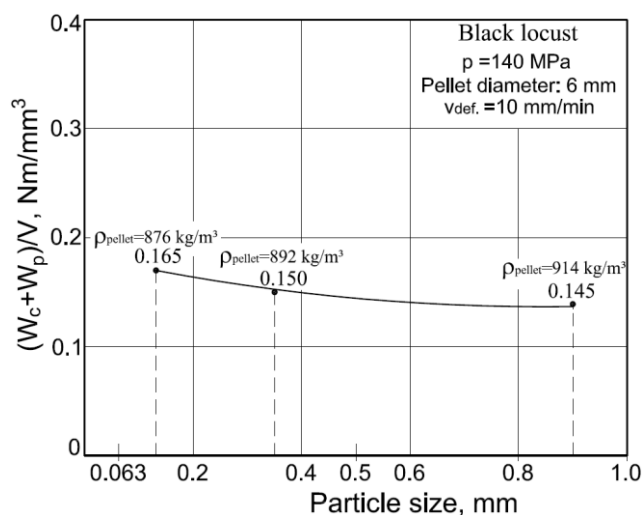


Fig. 10. The change in the specific work as a function of particle size using black locust

Table 3 - Summary of measurement results at 140 MPa pressure and with three different particle fractions: 0.063 to 0.2 mm, 0.2 to 0.5 mm and 0.8 to 1.0 mm

Species	Pressure	Specific energy W (Nm/mm ³)	Specific energy W (Nm/m ³)	W/p	Pellet specific gravity	Pellet diameter	σ_c (N/m ²)	$\gamma d / \sigma_c$
	p (N/m ²)				γ (N/m ³)	d (m)		
black locust	$1,4 \cdot 10^8$	0,165	$1,65 \cdot 10^8$	1,18	8760	0,006	$65 \cdot 10^6$	$8,08 \cdot 10^{-7}$
	$1,4 \cdot 10^8$	0,150	$1,5 \cdot 10^8$	1,07	8920	0,006	$65 \cdot 10^6$	$8,93 \cdot 10^{-7}$
	$1,4 \cdot 10^8$	0,145	$1,45 \cdot 10^8$	1,04	9140	0,006	$65 \cdot 10^6$	$8,74 \cdot 10^{-7}$
spruce	$1,4 \cdot 10^8$	0,160	$1,6 \cdot 10^8$	1,14	8220	0,006	$55 \cdot 10^6$	$8,96 \cdot 10^{-7}$
	$1,4 \cdot 10^8$	0,150	$1,5 \cdot 10^8$	1,07	8420	0,006	$55 \cdot 10^6$	$9,18 \cdot 10^{-7}$
	$1,4 \cdot 10^8$	0,138	$1,38 \cdot 10^8$	0,99	8750	0,006	$55 \cdot 10^6$	$9,54 \cdot 10^{-7}$

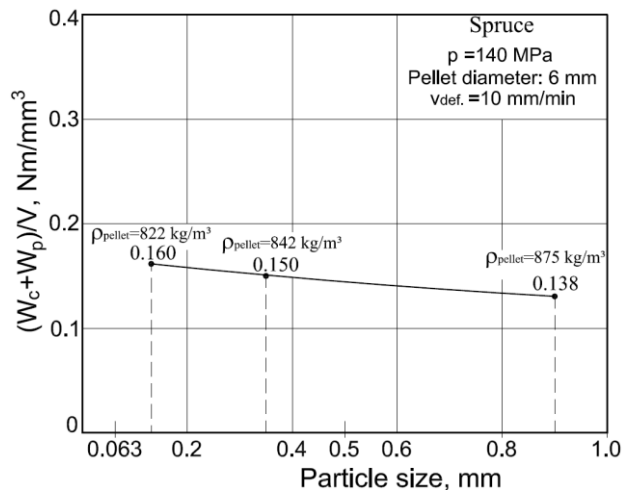


Fig. 11. The change in the specific work as a function of particle size using spruce samples

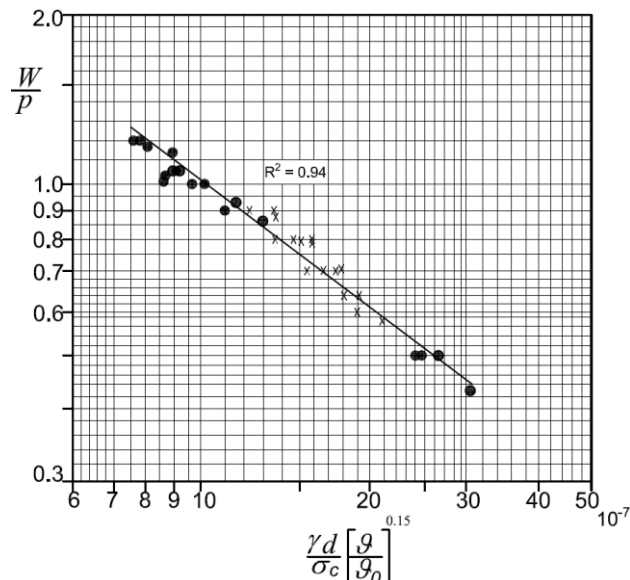


Fig. 12. The final similarity plot of all measurement results

It should be noted that these experiments were carried out in a closed space and intermittent manner. In practice, however, the pellet making takes place continuously. In continuous operation, the push-out force is almost the same as the maximum compression force, since the compression pressure must be counteracted by the friction force on the die wall. This means that in practice, the specific energy needs are somewhat higher.

Conclusions

Based on our research work the following conclusions may be drawn:

- The diameter of the press channel significantly influences the friction force between the pellet and the channel wall and, with this, the energy consumption of pressing,

- The compression energy decreases by 30 to 35% compared to 25°C when the compression temperature is around 100°C. At temperatures above 100°C this reduction is more limited,

- The particle size has moderate impact on energy demand, so ignoring it does not cause a significant error in the calculation of energy demand,

- We have shown that the dimensional analysis method is an effective way to process experimental results in order to obtain generally valid relationship. The similarity equation obtained can be used to calculate the energy requirement of pelleting for arbitrary input parameters regardless of wood species.

References

1. Akdeniz, R.C.; Haghighat, S., (2013): The effect of die dimensions, raw material moisture content and particle size on pelleting characteristics of olive cake. Department of Agricultural Machinery, International Conferences Engineering, Agriculture, Waste Management and Green Industry Innovation. Gödöllő, Hungary, 13-19. october, S. 33-41.
2. Buckingham, E., (1914): On physically similar systems: illustrations of the use of dimensional equations, *Physical Review*, 4, S. 345-376. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.4.345>
3. Carlos, S.; Tore, F.; Geir, S.; Odd-Ivar, L.; Olav, H.; Reidar, B., (2010): Compression rheology and physical quality of wood pellets pre-handled with four different conditions. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, Norwegian, 14:152-168.
4. Csanády, E.; Magoss, E., (2013): *Mechanics of Wood Machining*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 25-30. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29955-1>
5. Hofko, B., (2008): „Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalten“; *Straße und Autobahn*, 2008(5): 253 - 262.
6. Kocsis, Z., (2015): A fa szemcsés halmazok tömörítésének reológija és energetikája a pelletálási tartományban. [The compression rheology and energetics of wood particle sets at pelleting range]. Ph.D. dissertation, Hungary, Sopron, 134 p. <http://dx.doi.org/10.13147/NYME.2015.002>. (in Hungarian).
7. Langhaar, H., (1951): *Dimensional analysis and theory of models*. John Wiley London. S. 25-34.

8. Molnár, S., (1999): Faanyagismerettan [Wood material science]. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, pp. 260-292. (in Hungarian).

9. Sitkei, Gy., (1994): Non-linear rheological method describing compaction processes. Int. Agrophysics, 8:137-142.

10. Sitkei, Gy., (1997): A non-linear Viscoelastic-Plastic Model Describing Compaction Processes. Proc. of the 2nd Int. Conf. of IMACS/IFAC Budapest, S. 105-112.

11. Schwanghart, H., (1969): Messung und Berechnung von Druckverhältnissen und Durchsatz in einer Ringkoller-Strangpresse. Aufbereitungs-Technik. 12:713-722.

©Zoltán Kocsis – Associate Professor: e-mail: kocsis.zoltan@uni-sopron.hu; H-9400 SOPRON, Bajcsy-Zs. u. 4. Institute of Machinery and Mechatronics, University of Sopron, Sopron, Hungary ; Etele Csanády - Professor: e-mail: csanady.etele@uni-sopron.hu; H-9400 SOPRON, Bajcsy-Zs. u. 4. Institute of Machinery and Mechatronics, University of Sopron, Sopron, Hungary

УДК 674.816.2

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРИЗОВАННОГО АРБОЛИТА, СОДЕРЖАЩЕГО ПОЛИСТИРОЛЬНЫЙ ГРАВИЙ

А.М. Адамия

Статья посвящена исследованию механических свойств поризованного теплоизоляционно-конструкционного древесно-цементного материала – арболита, содержащего вспученный полистирольный гравий (ПАП). Для получения из крупнопористой структуры арболита слитной структуры, понижения водопотребности смеси, снижения влажности изделий и конструкции в арболите инертный органический заполнитель (древесная дробленка) частично (до 35%) был заменен вспученным полистирольным гравием. Размеры гравия были соизмеримы с крупностью пор арболита на древесном заполнителе. При выборе полистирольного гравия были учтены его физические свойства: средняя плотность и водопоглощение. В исследовании использован состав арболита, который был получен в результате изучения влияния вспученного полистирольного гравия на структуру и прочность поризованного арболита марки М25 (В2). В статье изложены определение кубиковой и призмочной прочности; прочности при осевом растяжении; модуля упругости при сжатии и растяжении, коэффициента Пуассона; предельной сжимаемости и растяжимости. В табличном виде представлены результаты исследования выше перечисленных механических свойств ПАП. Определен коэффициент призмочной прочности ($\lambda=0,81$) и она выше, чем рекомендовано по СН549-82 «Инструкция по проектированию и применению конструкций из арболита». Прочность на осевом растяжении ПАП выше, чем арболита на древесном заполнителе. В исследовании модуля упругости при сжатии, определили среднее значение коэффициента Пуассона ($\nu=0,19$) и он соответствует нормируемому значению. Предельная сжимаемость и растяжимость, а также среднее значение коэффициента пластичности находятся в интервале допустимого. Установлено, что арболит, содержащий вспученный полистирольный гравий, является упруго-пластическим материалом.

Ключевые слова: поризованный арболит, полистирольный гравий, свойства, прочность.

The article is devoted to the investigation of mechanical properties of pored heat-insulating structural wood cement material called wood concrete containing expanded polystyrene gravel. In order to obtain solid-structured wood concrete from coarse-pored wood concrete, to reduce water requirements for the mixture, to reduce humidity of the products and the constructions the inert organic filler (wood crushed stone) was partially replaced (up to 35%) by expanded polystyrene gravel in wood concrete. The size of the gravel equaled the size of the pores of wood concrete containing wood-based filler. When choosing polystyrene gravel, its physical properties are taken into account, i.e. the average density and water absorption. The study examines the composition of the wood concrete, which was obtained as a result of using the influence of expanded polystyrene gravel on the structure and strength of pored wood concrete grade М25 (В2). The article describes the definitions of cube and prismatic strength; axial tension; a modulus of elasticity under compression and expansion, the Poisson coefficient; relative compressibility and dilatability. The results of the study of the above listed mechanical properties of the wood concrete containing expanded polystyrene

gravel are presented in a table. The coefficient of prismatic strength ($\lambda = 0.81$) is determined, it is higher than recommended by CH549-82 Instructions for the design and application of structures from wood concrete."The axial tension of the wood concrete containing expanded polystyrene gravel is higher than that containing wood-based filler. The study of the modulus of elasticity under compression determines the average value of the Poisson coefficient ($\nu = 0.19$), it corresponds to the specified value. The relative compressibility and dilatability, as well as the average value of the coefficient of plasticity, is within the specified range. It is established that the wood concrete containing expanded polystyrene gravel is an elasto-plastic material.

Key words: pored wood concrete, polystyrene gravel, properties, strength

Введение

В промышленности строительных материалов преимущественное развитие получают производство изделий, обеспечивающие снижение материалоемкости, стоимости и трудоёмкости строительства, а также массы зданий.

Среди таких материалов определённое место занимает арболит, как эффективный лёгкий бетон, обладающий ценными строительными свойствами. Практически неограниченные сырьевые ресурсы дают право рассматривать развитие производства арболита как один из важных направлений в освоении прогрессивных строительных материалов.

Применение конструкций и изделий из арболита в строительстве показало высокую технико-экономическую эффективность данного материала. Это результат широкого применения новых местных строительных материалов из отходов промышленного и сельскохозяйственного производства [1,2], на основе которых были получены материалы (обычный и поризованный арболит) с положительными свойствами для изготовления теплоизоляционных и конструктивно-теплоизоляционных изделий.

Использование отходов древесины для изготовления арболита, усовершенствование его свойств и применения в строительстве является актуальным и научные исследования в этой области продолжается.

Для дальнейшего улучшения физико-механических параметров поризованного арболита на древесной дроблётке в составе смеси, древесную дроблётку частично заменили вспученным полистирольным гравием, крупностью соизмеримым с межзерновыми пустотами бетона. В результате чего за счет заполнения пор получается слитная структура материала и снижается водопотребность (в/ц) смеси [3]. На основании выполненных исследований установлено, что замена до 35%

дробленки вспученным полистирольным гравием, при сохранении прочности, улучшается свойства арболитовой смеси.

Экспериментальная часть

Задача настоящего исследования состоит в изучении механических свойств поризованного теплоизоляционно-конструкционного арболита, содержащего вспученный полистирольный гравий (ПАП). Расход материалов на 1 м³ арболитовой смеси принят в соответствии с ранее выполненными исследованиями [3]. Определяем следующие механические свойства:

1. Кубиковая и призмная прочность.

Прочностные характеристики определяли в соответствии с ГОСТ 19222-84, согласно которого за марку принимается предел прочности при сжатии контрольных кубов размером 15×15×15 см, твердевших при температуре 18...22°C и относительной влажности воздуха 60...80% в течение 28 суток.

При определении призмной прочности испытывали призмы размером 15×15×60 см в возрасте 28 суток. Определили коэффициент призмной прочности K_b , который равен отношению призмной прочности R_b к кубиковой R . Результаты исследований кубиковой и призмной прочности приведены в таблице 1.

Анализ данных таблице 1 показывает, что призмная прочность ПАП выше призмной прочности, рекомендованной по руководству [4], по инструкции [5], и совпадает со значениями арболита, поризованного воздухововлекающей добавкой [6].

2. Прочность при осевом растяжении.

Прочность при осевом растяжении определялась путем испытания призм из 3-х образцов размером 10×10×40 см на разрыв на машине марки «Амслер». При испытаниях призмы центрировали по физической оси, при этом деформации измерялись по четырем их

граням с помощью индикаторов с ценой деления 0,01 мм на базе 200 мм.

Таблица 1 - Кубиковая и призмная прочность ПАП

№ Образца	Прочность при сжатии, МПа		Коэффициент призмной прочности, K_b
	Кубиковая, R	Призмная, R_b	
1	2,60	2,03	0,78
2	2,56	2,07	0,81
3	2,67	2,19	0,82
4	2,54	2,10	0,83
5	2,63	2,07	0,79
6	2,51	2,13	0,85
Среднее:			0,81

Результаты исследований прочности при осевом растяжении (R_{bt}) ПАП приведены в таблице 2.

Из литературных данных [7,8,9,10] известно, что арболит имеет сравнительно высокую прочность при осевом растяжении. Например, отношение прочности при осевом растяжении цементного арболита к кубиковой прочности ($\frac{R_{bt}}{R}$) составляет для марок М25 0,2...0,25 [11]. По данным [8] отношение ($\frac{R_{bt}}{R}$)

вибропрокатного арболита для марок М15...М25 составляет 0,13...0,27; а по данным [12] соотношение ($\frac{R_{bt}}{R}$) арболита на основе гипсосоудержающих отходов составляет 0,18...0,26 для марок М25...М50. Для керамзитобетона ($\frac{R_{bt}}{R}$) составляет 0,06...0,1 [13] и для обычного бетона это отношение в среднем равно 0,1.

Таблица 2 - Прочность ПАП при осевом растяжении

№ образца	Возраст ПАП момент испытаний, сут.	Плотность $D_{сух.}$ кг/м ³	Влажность, W, %	Кубиковая прочность, R, МПа	R_{bt} , МПа	$\frac{R_{bt}}{R}$	$\frac{R_{bt}}{R_{ср.}}$
1	30	600	24,8	2,66	0,57	0,21	0,21
2	31	595	24,1	2,54	0,48	0,19	
3	31	610	24,5	2,70	0,62	0,23	

Анализ данных табл. 2 показывает, что прочность на осевое растяжение ПАП (М25) выше обычного арболита, поризованного пеной, принятых в инструкции [5].

3. *Модуль упругости при сжатии и растяжении, коэффициент Пуассона.* Модуль упругости при сжатии и растяжении ПАП определяли одновременно с оценкой призмной прочности и прочности на осевое растяжение. Из данного состава было испытано по 3 призмы. При обработке результатов испытаний для каждой призмы строился график деформаций в зависимости от нагрузки. Помимо этого, строился усредненный график, как среднее из 3-х результатов, и по нему определяли средний модуль упругости и коэффициент Пуассона. Значение деформаций ПАП и коэффициент Пуассона при сжатии в зависимости от уровня нагрузки приведены в таблице 3, а данные начального модуля упругости при осевом растяжении приведены в таблице 4.

Анализируя результаты исследований, необходимо отметить, что значения модуля упругости на различных ступенях нагрузки, в не зависимости от состава арболита, колеблются в пределах: при сжатии – от 1731 до 2069 МПа и при растяжении – от 1096 до 1561 МПа. Коэффициент Пуассона на различных ступенях нагрузки изменяется в пределах 0,167 ... 0,211. Среднее значение модуля упругости при сжатии ПАП составило 1884 МПа. Оно соответствует значению модуля упругости арболита, поризованного воздухововлекающей добавкой и в 1,65 раза выше модуля упругости арболита, поризованного технической пеной. Среднее значение коэффициента Пуассона (ν) составило – 0,19, что на 0,01 ниже величины (ν) арболита, поризованного технической пеной и воздухововлекающей добавкой и соответствует нормируемому значению [14]. Среднее значение модуля упругости при растяжении по нашим данным составило 1315 МПа. Это в 1,17 раза выше такого же показателя арболита, поризованного воздухововлекающей добавкой,

и в 1,43 раза ниже значения модуля упругости при сжатии, что соответствует данным НИИЖБ (в 1,35 раза) для арболита, поризованного пеной и результатам М. З. Симонова [15], полученным при исследовании этого показателя для легких бетонов на пористых заполнителях (в 1,4 раза). Изменение модуля упругости при растяжении

аналогично изменению его при сжатии (см. таблицу 3).

Таким образом, значения начального модуля упругости и коэффициента Пуассона ПАП можно с достаточной точностью принимать по инструкции [5].

Таблица 3 - Зависимость начального модуля упругости и коэффициента Пуассона ПАП при сжатии от уровня напряжений

№ призм	Уровень напряжения, МПа	Нормальные напряжения, МПа	Деформации мм/м		Модуль упругости при сжатии, МПа	Коэффициент Пуассона
			продольные	поперечные		
1	0,1	0,261	0,127	0,022	2055	0,173
	0,2	0,522	0,269	0,050	1940	0,186
	0,3	0,783	0,415	0,081	1886	0,195
	0,4	1,044	0,569	0,114	1835	0,200
	0,5	1,305	0,721	0,149	1810	0,207
Среднее:					1905	0,192
2	0,1	0,253	0,132	0,022	1916	0,167
	0,2	0,506	0,275	0,053	1840	0,178
	0,3	0,759	0,424	0,078	1790	0,184
	0,4	1,012	0,576	0,110	1757	0,191
	0,5	1,265	0,731	0,147	1731	0,201
Среднее:					1807	0,184
3	0,1	0,269	0,130	0,023	2069	0,177
	0,2	0,538	0,272	0,051	1978	0,189
	0,3	0,807	0,421	0,082	1917	0,195
	0,4	1,076	0,570	0,116	1888	0,203
	0,5	1,345	0,727	0,153	1851	0,211
Среднее:					1941	0,195

Таблица 4 - Изменение начального модуля упругости ПАП при осевом растяжении в зависимости от уровня напряжения

№ призм	Уровень напряжения, МПа	Нормальные напряжения, МПа	Продольные деформации, МПа	Модуль упругости при осевом растяжении, МПа
1	0,1	0,048	0,033	1454
	0,2	0,096	0,071	1352
	0,3	0,144	0,108	1333
	0,4	0,192	0,150	1280
	0,5	0,240	0,204	1176
Среднее:				1319
2	0,1	0,055	0,039	1410
	0,2	0,110	0,084	1306
	0,3	0,165	0,134	1231
	0,4	0,220	0,191	1152
	0,5	0,275	0,251	1096
Среднее:				1239
3	0,1	0,064	0,041	1561
	0,2	0,128	0,086	1488
	0,3	0,192	0,138	1391
	0,4	0,256	0,199	1289
	0,5	0,320	0,265	1208
Среднее:				1387

4. *Предельная сжимаемость и растяжимость.* Предельную сжимаемость ($\varepsilon_{бу.}$), растяжимость ($\varepsilon_{бу.}$) и коэффициент пластичности $\lambda_{сж.}$, $\lambda_{р}$ ПАП определяли одновременно с испытанием призм на осевое сжатие и растяжение. Поперечные деформации устанавливали при испытании призм на осевое сжатие.

Коэффициенты пластичности ПАП при нагрузках, близких к разрушающей, вычисляли по продольным и поперечным деформациям при сжатии по формуле:

$$\lambda_{сж.} = \frac{\varepsilon_{бу.пласт.}}{\varepsilon_{бу.полн.}}$$

где $\varepsilon_{бу.пласт.}$ – пластическая деформация, полученная за время выдерживания образцы под нагрузкой (среднее графическое значение результатов измерения пластической деформации на четырех боковых гранях призмы);

$\varepsilon_{бу.полн.}$ – полная деформация (среднее арифметическое значение суммы пластической и упругой деформации, измеренных на четырех боковых гранях призмы).

Результаты исследований приведены в таблицах 5 и 6. Предельная сжимаемость цементного арболита по данным [16] находится в пределах от 3,8 до 11,2 мм/м, а предельная растяжимость – от 0,83 до 1,86 мм/м. Коэффициент пластичности при сжимающей нагрузке, близкой к разрушающей, равен в среднем 0,52. В наших исследованиях предельная сжимаемость ПАП изменялась в интервале 3,62...4,33 мм/м, а среднее значение ее составило 3,99 мм/м. Предельная растяжимость изменялась в интервале от 1,77 до 1,90 мм/м, а среднее значение ее составило – 0,185 мм/м.

Таблица 5 - Предельная сжимаемость ПАП

№ образца	Предельная сжимаемость, мм/м			Коэффициент пластичности при сжатии $b=R_b$
	упругая	пластическая	полная	
1	2,23	1,39	3,62	0,384
2	2,55	1,78	4,33	0,411
3	2,39	1,63	4,02	0,420
Среднее:			3,99	0,405

Таблица 6 - Предельная растяжимость ПАП

№ образца	Предельная растяжимость, мм/м			Коэффициент пластичности при растяжении $b=R_b$
	упругая	пластическая	полная	
1	1,20	0,68	1,87	0,364
2	1,15	0,62	1,77	0,350
3	1,21	0,70	1,90	0,366
Среднее:			1,85	0,360

Коэффициент пластичности ПАП, при нагрузке, близкой к разрушающей, находился в пределах 0,350...0,420, что не превышает аналогичного показателя, полученного в исследованиях [6,16,17].

Исходя из приведенных данных, можно заключить, что ПАП, как и обычный арболит, относится к упруго-пластическим материалам, в связи с чем большое значение приобретает исследование его деформативности при длительном нагружении.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что коэффициент призмной прочности ПАП составляет в среднем 0,81. Это позволяет считать, что рекомендуемые в СП63.13330-2012 значения $K_{пр}$ для бетонов на минеральных пористых заполнителях могут быть использованы и для ПАП;

2. Прочность на осевое растяжение ПАП выше принятых в инструкции по проектированию, изготовлению и применению изделий и конструкций из арболита СН549-82, СП63.13330-2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» и соответствует ГОСТ 19222-84;

3. Значение начального модуля упругости ПАП ($E_{сж} = 1884$ МПа; $E_p = 1315$ МПа) и коэффициент Пуассона ($\nu=0,19$) можно с достаточной для расчета точностью принимать по инструкции СН549-82;

4. Поризованный арболит на древесной дробленке, содержащий вспученный полистирольный гравий, относится к упруго-пластическим материалам;

5. Коэффициент пластичности ПАП ($\lambda=0,350 \dots 0,420$) при нагрузке, близкой к разрушающей, не превышает аналогичного показателя поризованного арболита на древесном заполнителе.

Литература

1. Щербаков А. С. Арболит. Производство и применение. – М.: Лесная промышленность, 1977. – 20 с.
2. Путляев И. Е., Савицкий А. Н. Техико – экономические аспекты повышения теплозащитных свойств легкобетонных стеновых панелей / Повышение теплозащитных свойств и эффективности производства легкобетонных конструкций и изделий: МДНТП им.Ф.Э. Дзержинского. – М.: 1986. – с. 133-137.
3. Савин В. И. Адамия А. М., Широкова О. А. Влияние вспученного полистирола на свойства поризованной арболитовой смеси и арболита // Научн. тр. / Моск. лесотехн. ин-т. – 1989. – Вып.216. – с. 79-86.
4. Руководство по проектированию и изготовлению изделий из арболита. – М.: Стройиздат, 1974. – 90 с.
5. Инструкция по проектированию, изготовлению и применению конструкций из арболита. СН549-82. – М.: Стройиздат, 1983. – 45 с.
6. Соколов Б. А. Конструкционный поризованный арболит на древесных заполнителях. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ.к.т.н. – М.: 1985. – 20с.
7. Арболит. Производство и применение. Составитель В. А. Арсенцев, - М: Стройиздат, 1977. – 347 с.
8. Бельский Ю. С., Кудрявцев А. А. Свойства вибропрокатного арболита / Бетон и ж/б. – 1975. - №3. – с. 21-22
9. Производство и применение арболита / В. Г. Разумовский, С. Г. Свиридов, Б.А. Смирнов и др. // Под ред. С. И. Хаедана. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 216 с.
10. Щербаков А.С. Основы повышенного качества арболита на древесных заполнителях. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. д.т.н. – М.: 1981.–42 с.
11. Щербаков А. С., Хорошун И. П., Подчуфаров В. С. Арболит. – повышение качества и долговечности. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 160 с.
12. Маменов М.Х. Разработка арболита на основе гипсосодержащих отходов производства фосфатных удобрений. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. – М.: 1983. – 21 с.
13. Алимов А. А. Исследование влияния структурных характеристик на основные физико-механические свойства бетонов. Автореф. дисс. на соиск. Уч. степ. к.т.н. – М.: 1970. – 21 с.
14. Свод правил СП63.13330-2012. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: Минстрой России, 2015. – 161с.
15. Симонов М. З. Основы технологии легких бетонов. – М.: Стройиздат, 1973. – 584 с.
16. А. с. 300447 СССР, МПК С04В 43/14. Способ изготовления арболитных изделий / Бужевич Г. А. СССР //опубл. в Б. И. – 1971. - №13. – с.91
17. Абраменков Н. И. Поризованный цементный арболит на древесных заполнителях. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. – М.: 1978.-22с.

Химическая технология древесины

УДК 676.031:54-112

ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ БИОМАССЫ БЕРЕЗЫ

А.В. Сафина, Д.М. Сайфутдинов, Р.Г. Сафин, А.Р. Хайрутдинова, К.В. Валеев, Л.Ш. Асаева, Д.А. Шайхутдинова

В данной статье дан анализ современного состояния техники и технологии химической переработки биомассы березы и получения экстрактивных веществ из ее коры, листьев и чаги. Приведены современные представления о теоретических основах процесса экстракции растительного сырья.

Ключевые слова: биологически активные вещества, исследование, экстракция, береза.

This article analyzes the current state of the technology and technology of chemical processing of birch biomass and the extraction of extractives from its bark, leaves and chagi. Present ideas about the theoretical foundations of the extraction of plant raw materials are presented.

Keywords: biologically active substances, research, extraction, birch.

Введение

Получение биологически активных веществ является одним из самых передовых и перспективных направлений деревообрабатывающей промышленности. Оно является примером удачного решения на пути объединения технологической переработки древесины и получения химических компонентов из древесного сырья [1]. Эта отрасль раскрывает куда больший потенциал растительности, нежели использование дерева только в качестве сырья для пиломатериалов. В настоящее время экстрактивные вещества, благодаря своему множеству достоинств, нашли широкое применение в фармацевтической, медицинской, парфюмерной, косметологической, пищевой и других областях промышленности [2]. Тем не менее, их недостаток, как компонента для многих продуктов заключается в труднодоступности, которая обуславливается необходимостью наличия дорогостоящего оборудования, а также соблюдения сложнейшего технологического процесса, контролем дозирования растворителей и т.д. Также немало проблем доставляет недостаточное развитие и популярность данной отрасли, что в свою очередь влечет за собой пониженный спрос на конечный продукт [3]. Если в европейских странах использование химических компонентов, получаемых из древесного сырья,

активно развивается, то на российском рынке может оказаться довольно проблематично организовать сбыт такого товара [4].

Целью данного изыскания является анализ работ о способах получения биологически активных компонентов из биомассы березы и ключевых параметров, влияющих на процесс экстракции [5].

Структурный химический состав древесины во многом определяется ее породой. Элементарный состав абсолютно сухой древесины березы следующий: 49,5 % углерода, 44,2 % кислорода, 6,3 % водорода и 0,2 % азота [6]; 99% общей массы древесины составляют органические вещества, из которых можно выделить целлюлозу - 47 %, гемицеллюлозы - 30 %, лигнин - 19 %; 1 % приходится на минеральные вещества. К неосновному органическому составу относятся экстрактивные вещества, которые представляют не менее высокую ценность для промышленности. В случае березы, речь идет о бетулине, эфирных маслах и меланинах чаги [7].

Бетулин - органическое вещество с кристаллической структурой, содержащееся в наружном слое березовой коры и придающее ей белый цвет. После его открытия в 1778 году, в мировой фармакологии и фармацевтике к нему наблюдается большой интерес. Он нашел свое применение в качестве противовоспалительного

тельного, противоопухолевого и антисептического средства [8]. Бетулин не растворяется в воде, однако хорошо поддается этиловому спирту, эфиру. Его содержание в бересте равно 15-25 % от абсолютно сухой массы. Температура плавления составляет 258 °C [9].

Эфирное масло - летучая жидкость с выраженным запахом, нерастворимая в воде. В березе содержится преимущественно в ее листьях и почках. В последних содержание составляет в среднем 3-5 % [10]. Также как и бетулин, в большинстве случаев хорошо экстрагируется спиртами. В основном служит дереву в качестве вещества, ускоряющего метаболические процессы. Эфирные масла получают для использования в ароматерапиях, в косметологических средствах и в качестве пищевых ароматизаторов. В эфирномасленичных производствах, как правило, используют перегонку водяным паром или экстракцию растворителем.

Экстракт чаги - комплекс веществ, получаемых из березового гриба (чаги). Березовый гриб - это стерильная форма гриба, развивающаяся в результате заражения коры паразитами. Гриб наполняется полезными веществами благодаря течению березового сока и различным компонентам дерева, на котором он находится. Чага обладает противовоспалительными, кровоостанавливающими, общеукрепляющими и тонизирующими свойствами [11]. Главная ее особенность, как лечащего препарата - это наличие в ней антиоксидантов. Антиоксиданты чаги предотвращают процессы старения и разрушения клеток, нейтрализуют боль, очищают радикальные клетки. В производстве чагу сушат, измельчают, экстрагируют горячей водой или спиртом и отфильтровывают экстракт [12].

Суть технологии экстракции заключается в извлечении вещества из раствора с помощью растворителя. По способу выделения экстрактивные вещества делятся на выделяемые органическими растворителями, экстракцией водой и при перегонке с паром [13].

Бетулин, содержащийся в наружном слое коры березы извлекается экстракцией органическими растворителями. К наиболее используемым растворителям можно отнести: петролейный и диэтиловый эфир, этиловый спирт, гексан, пентан, бензол, толуол, хлороформ, дихлорэтан, этилацетат,

четырёххлористый углерод [14]. Такая экстракция может применяться, например, когда невозможно использование дистилляции или же при дистилляции получается продукт ненадлежащего качества. Растворители, используемые в экстракции, должны соответствовать определенным требованиям. Они должны незначительно растворяться в растворе, содержащем экстрагируемое вещество, значительно лучше растворять вещество, чем растворитель, в котором находится это вещество, не должны химически взаимодействовать ни с растворителем, ни с экстрагируемым веществом. Также хорошим показателем для растворителя будет его невысокая температура кипения. Дело в том, что чем выше необходимая для экстракции температура, тем больше шанс образования нежелательных продуктов распада и, соответственно, их количество. Однако, как правило, в большинстве случаев в качестве органического растворителя используется этиловый спирт, температура кипения которого равна 78 °C и именно эта температура будет наиболее оптимальной для процесса в данном случае (наибольший выход продукта в экстракционных процессах получается при температуре кипения растворителя) [15].

Экстракция водой или водными растворами кислот, щелочей и солей называется также холодной экстракцией или выщелачиванием. Операции подобного типа обычно проводят в стеклянных или фарфоровых емкостях. Принцип экстракции водой сводится к тому, что к извлекаемому веществу добавляют воду или водный раствор, а затем перемешивают механическим путем [16]. После перемешивания осуществляется отстаивание жидкости. Затем ее сливают через фильтр в заранее подготовленную емкость. Оставшуюся массу снова заливают водным раствором. Цикл продолжается до тех пор, пока не будет достигнут полный выход нужного вещества. Окончание экстракции осуществляют исходя из нужной концентрации конечного продукта. Для ее определения к веществу добавляют реагент и, в зависимости от реакции, устанавливается необходимость продолжения процесса [17].

Для ускорения процесса в качестве отстаивания может использоваться откачка воды вакуум-насосом или с использованием «фильтровальных палочек». Расположение стаканов ступенчато по высоте позволяет производить слив жидкости с помощью

сифонных трубок [18]. Эти методы позволяют несколько автоматизировать процесс экстракции.

В эфиромасленичных производствах, в том числе при получении эфирных масел из почек березы, используется паровая дистилляция или перегонка. Это испарение жидкости с последующим охлаждением пара и его конденсацией. Способ относительно прост в исполнении и применяется с давних времен. Суть процесса заключается в том, что растительное сырье помещают в воду, температура которой близка к кипению или же нагревают на пару. Под воздействием повышенной температуры происходит распад клеточной структуры материала и выделение из него летучих фракций. Установки для дистилляции построены таким образом, что пар, содержащий в себе молекулы эфирных масел, из активной зоны поднимается в конденсатор, где переходит в жидкое состояние [19]. Жидкость, которая собирается в специальном отсеке – это смесь эфирных масел и воды. Дальнейшая сепарация не представляет затруднений, так как плотность этих веществ ощутимо различается. Метод перегонки с водяным паром дает достаточно высокий и качественный выход эфирных масел.

Анализ экспериментальных исследований

Процессы экстракции бетулина и эфирных масел с использованием различных технологий, а также технологических параметров, были исследованы во многих научных работах.

В работе Коптеловой Е.Н. и других авторов [20] было рассмотрено влияние СВЧ – поля на динамику извлечения экстрактивных веществ из бересты, преимущественно бетулина и определены наиболее оптимальные значения параметров для проведения процесса. В результате чего, было выявлено, что экстракция бересты с использованием микроволновой обработки в СВЧ – поле позволяет в 10 – 15 раз сократить продолжительность процесса по сравнению с традиционными методами экстракции, длительность которых доходит до нескольких часов. Также показано, что для максимальной эффективности следует использовать этиловый спирт с концентрацией 86 %.

В другой работе Коптеловой Е.Н. и др. [21] рассматривался процесс извлечения бетулина и экстрактивных веществ из наружного слоя коры березы. Было доказано многократное ускорение

процесса экстракции за счет воздействия микроволнового излучения СВЧ – поля. Из наиболее значимых параметров, влияющих на совершенствование процесса выделили степень и характер измельчения сырья. Это объясняется тем, что клеточная структура бересты разрушается при размалывании с образованием неровной поверхности сырья. Наиболее быстро поддается экстракции то сырье, клеточная структура которого разрушена больше, так как возрастает поверхность процесса экстракции и усиливается процесс вымывания экстрактивных веществ из разрушенных клеток.

В настоящее время интенсификация процессов микроволновым излучением применяется во многих промышленных отраслях, в том числе в деревообработке. Процессы с использованием этой технологии отличаются высокой скоростью и большой эффективностью. Эти процессы несомненно требуют значительных затрат для воплощения соответствующей технологии, но в то же время позволяют упростить технологическую схему, заменив все используемые в данное время установки, аппараты и процессы, связанные с подготовкой теплоносителя, и значительно повысить выход продукта и его качество.

В работе Захаровой А.И. и др. [22] представлены результаты сверхвысокочастотной экстракции луба березовой коры. В качестве сырья был выбран лубяной слой. Березовая кора является легкодоступным и многотоннажным материалом в связи с тем, что в деревообрабатывающих производствах она остается в виде отходов, подлежащих утилизации. Сам лубяной слой составляет около 80 % всей коры березы и содержит большое количество экстрактивных веществ, в особенности таннины. В работе показано, что выход экстрактивных веществ с увеличением расхода КОН от 10 до 30 % возрастает, с ростом концентрации C_2H_5OH от 10 до 30 % – уменьшается, с увеличением жидкостного модуля от 10:1 до 20:1 он проходит через максимум.

В исследованиях Береговцевой Н.Г. и др. [23] исследован процесс экстракции наружного слоя коры березы этиловым и изопропиловым спиртами. В работе указано, что экстракция алифатическими спиртами при повышенных температурах позволяет значительно сократить продолжительность процесса, а также увеличить выход продукта по сравнению с

традиционными условиями экстракции в 1,5 раза. Наиболее распространенные методы получения бетулина из бересты основаны на экстракции в аппарате Сокслета с использованием различных органических растворителей, а также на щелочном гидролизе бересты с последующим выделением бетулина. Исследованиями доказано, что повышенная температура (100-150 °С) и давление (2 МПа) положительно влияют на скорость выхода продукта и его качество.

В научной работе Кузнецова Б.Н. и других авторов [24] проводились исследования экстракции бетулина низшими алифатическими спиртами из бересты, активированной перегретым паром в присутствии щелочи. При активации бересты происходит дезинтеграция ее исходных частиц, но не достигается требуемая степень гидролиза. После проведения достаточного гидролиза с использованием щелочи, наблюдается качественный выход бетулина. В ходе исследования, авторами были определены оптимальные значения технологических параметров. Опыты проводились при температуре 240 °С и давлении 3,4 МПа. Практически все количество экстрагируемого вещества выделялось в интервале от 120 до 300 с. Содержание щелочи для наиболее эффективного гидролиза составляло 15-20 %. При этом обеспечивалась максимальная степень выхода бетулина (до 97%).

Свойства бетулина и других продуктов гексанового экстракта бересты исследовались в работе Кузнецовой С.А. и других авторов [25]. Основными компонентами экстракции наружного слоя коры являются бетулин и лупеол. Определено, что гексановый экстракт содержит 88,3 % бетулина и 9,6 % лупеола. Были проведены опыты по установлению токсичности. Бетулин вводился мышам внутрижелудочно в виде 10% крахмальной взвеси. При введении в дозах от 1000 до 6000 мг/кг гибель животных не наблюдалась, однако имелось угнетение центральной нервной системы. Начиная с дозы в 7000 мг/кг зафиксирована гибель нескольких особей. Исходя из опытов, по международной токсикологической классификации, бетулин не обладает токсичностью и относится к 4 - му классу опасности (незначительно опасные вещества). Сделан вывод о том, что в сочетании с капилляропротекционными свойствами,

бетулин является потенциальным лекарством от множества заболеваний.

В работе Кузнецовой С.А. и др. [26] исследовались физико - химические и фармакологические свойства бетулина. Для определения химического состава вещества использовались электронно - сканирующая микроскопия, элементный анализ, ИК и ЯМР спектроскопия. По данным элементного состава экстракт содержит: (С) 81,9 %, (Н) 11,5%, (О) 7,9%. Определено, что бетулин является нетоксичным веществом (ЛД₅₀ = 6500 мг/кг). Представлены результаты гастрозащитных свойств бетулина (противоязвенная активность - 9,3), которые указывают на его высокое противоязвенное действие.

Фармакологические свойства бетулина имеют множество положительных качеств и заслуживают особого внимания. Препараты, основанные на содержании бетулина, способны нейтрализовать воздействие нейтральных радикалов и восстанавливать структуру поврежденных клеток. Употребление таких лекарств облегчает приспособление организма к таким неблагоприятным факторам, как воздействие окружающей среды, стресс, чрезмерные физические и умственные нагрузки. Бетулин эффективен в комплексном лечении онкологических заболеваний, защищает от повреждений и разрушений клетки печени и имеет высокую противовирусную активность.

В работе [27] представлена технология тонкоплочной парофазной экстракции. В качестве экстрагента использовали водно - этанольную смесь. Слой бересты орошали конденсатом экстрагента. Повышенный градиент концентраций веществ в системе "экстрагент - береста" позволил интенсифицировать процесс экстракции. В дальнейшем осуществляли очищение экстракта посредством его перекристаллизации из высококипящих алифатических углеводородов или их смесей. В целом технология позволяет получать бетулин с чистотой до 99%, пригодный для дальнейшего использования.

С целью совершенствования методов выделения экстракта коры, Кузнецов Б.Н. и другие авторы [28] в своей работе провели экстракцию с предварительной активацией бересты водяным паром в условиях «взрывного» автогидролиза. Температура активации поддерживалась в интервале от 180 до 240 °С, давление пара от 1 до 3,4 МПа, продолжительность процесса равнялась 30 - 360

с. Установлено, что эффективность экстракции бетулина спиртами повышается на 25-40% после активации паром. Это обусловлено разрыхлением бересты и ее частичного гидролиза. При обработке паром с использованием щелочи удалось достичь 97% степени извлечения бетулина.

Левданский В.А. и др. [29] разработали способ получения бетулина и суберина из бересты, в котором также предлагается предварительная обработка сырья водяным паром с использованием щелочи. Это позволило сократить продолжительность последующего гидролиза и достичь 95% степени извлечения бетулина. Совместный процесс активации и гидролиза был сокращен до 3 - 5 минут.

Существует множество способов получения химических компонентов из наружного слоя березовой коры, в особенности бетулина. Из существующих ныне работ, к наиболее используемым можно отнести технологии с использованием СВЧ – поля, с использованием активации и гидролиза, а также традиционный метод экстракции органическими растворителями без каких - либо модернизаций процесса. К недостаткам следует отнести трудоемкость и экономическую затратность процессов с использованием активации и гидролиза, а также СВЧ – поля. В свою очередь экстракция органическими растворителями недостаточно эффективна, так как бетулин сам по себе - вещество труднорастворимое и легко поддается растворению лишь этилацетатом и бутанолом. Из основных преимуществ, несомненно можно отметить крайне быстрое протекание процесса с использованием СВЧ - поля и активации гидролизом, которое занимает считанные минуты. Преимущество традиционного экстрагирования в том, что наиболее используемые этиловый спирт и этилацетат являются нетоксичными и легкодоступными реагентами.

В работе Гореловой Е.Г. и других авторов [30] проводилось экстрагирование березовых почек водой. Осуществлялся подбор оптимальных параметров для повышения эффективности процесса. Наилучшими показателями были выбраны: длительность процесса - 3 ч., температура 50 °С. Этого достаточно для качественного выхода нужного продукта и получения высокого содержания витамина С. Также было определено, что при предварительном настаивании березовых почек

в течение дня при комнатной температуре до процесса экстракции, выход экстрактивных веществ остается на том же уровне, но содержание витамина С сокращается примерно вдвое.

Процессы экстракции эфирных масел из биомассы березы были рассмотрены Деминой Л.Н. и др. [31]. Опыты проводили на специально сконструированной установке в режимах настаивания и орошения. Процесс осуществлялся в диапазоне температур от 20 до 90 °С. Размер частиц 1 - 2 см. Концентрация спирта 20 - 90 %. Было установлено влияние технологических параметров на динамику, состав и выход эфирных масел из почек березы. Оптимальными параметрами проведения водно - этанольных процессов в режиме настаивания для почек березы являются – продолжительность 4 ч, температура 78,4 °С, концентрация этанола в растворе 90 %. Установлено, что совмещение элементов аппаратов Сокслета, Клевенджера при замене стекла на нержавеющую сталь и увеличении объема до 0,5 кг обеспечивает совмещение жидкостной экстракции с паровой, изменение режима экстрагирования без смены сырья, возможность фракционирования экстракта.

Ефремов А.А. и др. [32] в своих исследованиях рассмотрели достоинства и недостатки существующих методов дистилляции эфирных масел из растительного сырья. Авторы определили, что большинство процессов получения эфирных масел осуществляют методом гидродистилляции и пародистилляции. В случае некоторых цветковых растений дистилляция невозможна и применяют другие методы экстракции. Сделан вывод о том, что метод гидродистилляции обладает рядом недостатков, главным из которых является низкая степень насыщения паровой фазы эфирным маслом. Это обуславливает большие затраты воды и низкий выход продукта. В свою очередь пародистилляция с использованием перегретого пара привлекает больше внимания, ввиду своей экономичности и технологической удобности.

С целью определения оптимальных значений параметров экстракции листьев березы, Савенко А.В. и другие авторы [33] провели серию опытов. Использовались высушенные в естественных условиях листья березы и дистиллированная вода 20 °С. Подтверждено, что увеличение гидро модуля приводит к росту потребляемой энергии.

Вместе с мощностью возрастает и равновесная концентрация экстракта, так как вместе с увеличением количества твердой фазы увеличивается и количество потенциально растворимых веществ в объеме аппарата, а растворяющей способности экстрагента достаточно для достижения концентрации 0,9 %. Так как показатель эффективности процесса отображает баланс между затраченной энергией и количеством полученных веществ, то относительно большое увеличение потребляемой мощности при относительно небольшом увеличении равновесной концентрации для гидромодуля приводит к его снижению, несмотря на предшествующий рост.

В работе [34] изучен химический состав листьев и почек березы. Анализ произведенный методом УФ - спектроскопии показал, что в экстракте почек содержатся флавоновые и флавоноловые гликозиды, главным образом гиперозид (3 - О - галактозид кверцетина) – 0,8 – 1,5 %. В почках березы выявлены также стерины, дубильные вещества пирокатехиновой группы (1,07 – 9 %), горечи, кумарины (0,09 – 0,44 %), антоцианы, смолы (бетулестер), бутиловый эфир бетулоретиновой кислоты, 8–10% сахаров, инозиты, горечи, аскорбиновая (до 2,8 %) и никотиновая кислоты, никотинамид, каротин. Наличие данных компонентов определяет экстракт почек березы как вещества, обладающего дезинфицирующим и противовоспалительным действием, что в свою очередь предполагает эффективное использование их в лекарственных препаратах. Также методом гидродистилляции из почек было получено эфирное масло, в состав которого преимущественно входят сесквитерпеновый спирт бетулол (19,7 %) и его эфиры с уксусной кислотой (26,3%). Был проведен опыт по экстракции биологически активных веществ из листьев и почек березы посредством ультразвуковой обработки в присутствии экстрагента эфирного пихтового масла при температуре 20 - 25 °С. Предложенный способ показал высокую эффективность. Он позволяет существенно увеличить скорость экстракции, снизить температуру и время тепловой обработки, способствует более полному экстрагированию веществ.

Существует несколько способов получения эфирных масел из древесной зелени. Это прессование, дистилляция, экстракция и анфлераж. При выделении масел из листьев и

почек березы наиболее широко распространена дистилляция. Ввиду особенностей растительного сырья, прессование и экстракция больше подходят для работы с цитрусовыми и цветковыми растениями, а анфлераж считается устаревшим и сложным методом. Дистилляция это естественный и самый экономичный способ получения масел. Она дает хороший выход продукта в чистом виде, не требуя больших энергозатрат.

Голованчиков А.Б. и др. [35] в своей работе исследовали зависимость концентрации химических компонентов чаги от времени ее экстрагирования. Использовалось измельченное сырье чаги. Опыт проводили методом мацерации при температуре 70 °С, используя 10 г сырья и 100 мл дистиллированной воды в качестве экстрагента. Была составлена математическая модель процесса и описана кинетика процесса экстракции компонентов на протяжении всего времени. В течение 5 часов интенсивность выделения экстракта оставалась достаточно прямолинейной. Только в интервале 1 - 2 часов наблюдалось незначительное возрастание в отношении остальных промежутков.

Грачева Н.В. и др. [36] в своем исследовании ставили целью изучение влияния электрического поля на процесс извлечения компонентов из чаги. Благодаря ситовому анализу для опыта отбирали фракции размером 3-4 мм. Экстракцию проводили методом настаивания при температуре 70 °С и соотношении сырье - экстрагент 1:6. Анализ результатов показал, что наложение электрического поля постоянного тока на процесс позволило значительно увеличить выход экстрактивных веществ. Также было определено, что проведение опыта при постоянном напряжении оказалось значительно эффективней, чем с использованием постоянной силы тока. Это явление обусловлено тем, что в процессе экстрагирования чаги происходит формирование гидрофильной полидисперсной коллоидной системы. При воздействии постоянного тока происходит качественное изменение структуры золя. В результате сопротивление среды возрастает, и подвижность ионов и поляризованных молекул биологически активных веществ снижается. В результате авторами было доказано, что наложение электрического поля при постоянном напряжении непосредственно на процесс экстракции чаги дает значительную

интенсификацию процесса за счет увеличения степени истощения сырья при меньшем времени обработки.

Комплексная переработка сырья чаги была предложена Кузнецовой О.Ю. [37]. Она включает получение основного продукта, переработку вторичного сырья с выделением из него биологически активных веществ и создании на их основе продуктов различной направленности. В основном исследование основывалось на выборе основного оптимального экстрагента, который бы обеспечивал максимально эффективный выход экстракта. Фактически автор предложил универсальную и эффективную технологическую схему, которая может внедряться как на малых предприятиях отрасли, так и на крупных производствах, специализированных на переработке растительного сырья.

В работе [38] показаны результаты экстракции водного извлечения из березового гриба диэтиловым спиртом, определен состав экстракта. Водные извлечения получали методом мацерации. Качественный состав извлечений определяли методом хроматографии. Большую часть составляют зольные элементы – 25.00–29.00 %, а также азот общий – 0.48–0.55 %, полисахариды – 6.00–8.00 %, летучие кислоты – 0.73–0.79 % и др. Водное извлечение чаги обрабатывали петролейным эфиром. Экстракт содержит 0.41 % экстрактивных веществ от сухого остатка водного извлечения чаги. Были сделаны выводы о том, что сумма фенольных веществ экстракта составляет 71 % от суммы экстрактивных веществ. Из водного извлечения чаги диэтиловым эфиром экстрагируются простые фенолы, фенолкарбоновые кислоты, катехины, флавоноиды и полисахариды, состоящие из глюкозы, ксилозы, галактозы, арабинозы и метилированных уроновых кислот. Впервые в водном извлечении чаги установлены следующие вещества: флороглюцин, феруловая, оксибензойная, оксифенил - пропионовая кислоты, изорамнетин, метилированные уроновые кислоты.

В своем исследовании Сысоева Е.В. [39] предложила способ получения водных извлечений чаги мацерацией с СВЧ – обработкой. Это позволило более чем в три раза сократить как длительность процесса, так и его энергоёмкость. Меланин из водных извлечений чаги был выделен с помощью хлорида кальция,

это позволило повысить его выход, изменить его структурную организацию, а также компонентный состав по сравнению с меланином, осаждённым хлористоводородной кислотой. Разработанные подходы позволили повысить эффективность извлечения биологически активных компонентов из сырья чаги, обеспечить безвредность получаемых продуктов и поэтому могут быть рекомендованы для применения на фармацевтическом производстве.

Заключение

Результаты представленных исследований свидетельствуют о необходимости предварительной обработки биомассы березы для дальнейшей экстракции, а также внедрении инновационных технологий. Традиционные методы экстракции характеризуются длительным и трудоемким технологическим процессом, что осложняется труднодоступностью для большинства растворителей таких компонентов как бетулин и протеканием различных нежелательных химических реакций в процессе получения нужных компонентов. Несмотря на востребованность в дорогостоящем оборудовании, такие методы как предварительная активация бересты с последующим щелочным гидролизом, обработка березовой зелени ультразвуком, а также всевозможные виды экстракции с применением СВЧ – поля на данный момент значительно превосходят по эффективности традиционные методы экстракции.

Литература

1. Соколов, С.Я. Справочник по лекарственным растениям / С.Я. Соколов, И.П. Замотаев. –М.:Медицина. -1984. - 464 с.
2. Дунюшкин, Е. В. Выделение бетулина и суберина из бересты березы повислой на южном Урале / Е. В. Дунюшкин // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: материалы Междунар. конф. с элементами науч. школы для молодежи, 28 июня-2 июля 2010. – Йошкар-Ола : Марийский гос. техн. унт, 2010. – С. 74-77.
3. Пастушенков, Л.В. Лекарственные растения. Использование в народной медицине и быту: 5-е изд., перераб. и доп. / Л. В. Пастушенков, А. Л. Пастушенков,

В. Л. Пастушенков. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 432 с.

4. Муравьева, Д.А. Фармакогнозия: Учебник./Д.А. Муравьева. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Медицина, 1991. — 560 с.

5. Балвочюте, Я.П. Эфирные масла почек берез в условиях Литовской ССР / Я.П.Балвочюте, Ю.А.Акимов, А.В.Моркунас // III симпозиум «Актуальные вопросы изучения и использования эфиромасличных растений и эфирных масел»: тез. докл. Симферополь, 1980. — 222 с.

6. Войткевич, С.А. Эфирные масла для парфюмерии и ароматерапии / С.А. Войткевич. — Изд-во «Пищевая пром-сть», 1999. — 284 с.

7. Шретер, А. И. Лекарственная флора Советского Дальнего Востока / А. И. Шретер. — М.: Изд-во «Медицина», 1975. — 328 с.

8. Максимов, О.Б. Полифенолы дальневосточных растений / О. Б. Максимов, Н. И. Кулеш, П. Г. Горовой. — Владивосток: Дальнаука. -2002. — 332 с.

9. Соколов, П.Д. Растительные ресурсы СССР: Цветковые растения, их химический состав, использование; Семейства Magnoliaceae — Limoniaceae / П.Д. Соколов. -Л.: Наука, 1984. — С. 159 — 161.

10. Ведерников, Д.Н. Экстрактивные вещества почек березы повислой *Betula pendula* Roth. (Betulaceae). 3. Состав тритерпеновых кислот, флавоноидов, спиртов и эфиров/ Д.Н. Ведерников, В.И. Рощин // Химия растительного сырья. - 2010.- №4.-С. 67–75.

11. Тутурин, Н.Н. Экстрагирование, экстракция // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона : в 86 т. (82 т. и 4 доп.). — СПб., 1890—1907.-с. 187

12. Балабудкин, М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. / М.А. Балабудкин. -М.: Медицина. изд.фирма, 1983. -160 с.

13. Гончаренко, Г.К. Кинетика экстрагирования растительного материала/ Г.К.Гончаренко, Е.И. Орлова // Мед. пром - ть СССР. -1992. -№ 3.-с. 55-57

14. Романков, П.Г. Экстрагирование из твёрдых материалов. / П.Г. Романков, М.А. Курочкина. -Л.: Химия. изд. фир- ма. - 1983. -367 с.

15. Пономарев В.Д. Экстрагирование лекарственного растительного сырья. / В.Д. Пономарев. -М.: Медицина. изд. фирма, 1976. -210 с.

16. Молчанов, Г.И. Интенсивная обработка лекарственного сырья. / Г.И. Молчанов. -М.: Медицина. изд.фирма, 1981. -241 с.

17. Минина, С.А. Характеристика алкалоидов. Общие методы их выделения и разделения. /С.А.Минина. -ХФИ. изд.фирма, 1978. -488 с.

18. Минина, С.А. Антрахиноновые гликозиды. Химическая структура, методы выделения, очистки и анализа. / С.А.Минина, Л.Л. Шимолина. -СПб.: ХФИ. изд. Фирма. - 1993. -272 с.

19. Минина, С.А. Сапонины. Методы выделения, разделения, очистки и анализа./ С.А. Минина, Л.Л. Шимолина. -СПб.: ХФИ. изд.фирма. -1992. -16 с.

20. Коптелова, Е.Н. Интенсификация процесса выделения бетулина из бересты с использованием СВЧ-поля / Е.Н. Коптелова, Л.Н. Кузнецова, Н.А. Кутакова, С.И. Третьяков // Лесной журнал. — 2013. — № 5. — С. 23–33. .

21. Коптелова, Е.Н. Извлечение экстрактивных веществ и бетулина из бересты при воздействии СВЧ-поля / Е.Н. Коптелова, Н.А. Кутакова, С.И. Третьяков // Химия растительного сырья. — 2013. — № 4. — С. 159–164.

22. Захарова, А.И. Выделение экстрактивных веществ из луба коры березы при воздействии СВЧ-поля / А.И. Захарова, С.И. Третьяков, Н.А. Кутакова, Е.Н. Коптелова // Лесн. журн. -2015. -№ 4. -С. 148–155.

23. Береговцова, Н.Г. Исследование процесса экстракции бересты березы этанолом и изопропанолом при повышенных температурах / Н.Г. Береговцова, В.И. Шарыпов, С.В. Барышников, Б.Н. Кузнецов // Химия растительного сырья. -2012. -№ 1. —с. 71-75.

24. Кузнецов, Б.Н. Экстракция бетулина низшими алифатическими спиртами из внешней коры березы *Betula pendula* roth., активированной преегретым паром в присутствии щелочи. / Б.Н. Кузнецов, В.А. Левданский, Н.И. Полежаева // Химия растительного сырья. -2004. -№2. — с. 21-24.

25. Кузнецова, С.А. Изучение состава гексанового экстракта бересты и его токсико — фармакологических свойств./ С.А. Кузнецова, Б.Н. Кузнецов, О.Ф. Веселова, Т.П. Кукина, Г.С. Калачева, Г.П. Скворцова, Е.С. Редькина. // Химия растительного сырья. -2008. -№1. —с.45-49.

26. Кузнецова, С.А. Выделение бетулина из бересты березы и изучение его физико – химических и фармакологических свойств. / С.А Кузнецова, Г.П. Скворцова, Ю.Н. Маляр, Е.С. Скурыдина, О.Ф. Веселова. // Химия растительного сырья. -2012. -№2. –с. 12-15.

27. Жук, В.В. Технология получения бетулина методом тонкоплочной паровфазной экстракции. / В.В. Жук, В.А. Яновский, О.Б. Самбуева, А.А. Бакибаев. // Химия растительного сырья. -2014. -№3. – с.247-253.

28. Кузнецов, Б.Н. Совершенствование методов выделения, изучение состава и свойств экстрактов березовой коры. / Б.Н. Кузнецов, С. А. Кузнецова, В. А. Левданский, И. Г. Судакова, О. Ф. Веселова. // Химия растительного сырья. -2005. -№3 с.391-400.

29. Левданский, В.А. Получение бетулина и суберина из бересты / В.А. Левданский, Н.И. Полежаева, Л.В. Сафонова // Химия растительного сырья. -2010. -№2. –с. 157-160.

30. Горелова, Е.Г. Разработка способа получения и исследование извлечения из березовых почек. / Е.Г. Горелова, О.Ю. Кузнецова, Р.З. Гильманов // Разработка и регистрация лекарственных средств. -2016. - №14. –с.62-64.

31. Демина, Л.Н. Процессы экстракции и совершенствование оборудования для получения эфирных масел и экстрактов из биомассы березы и смородины. диссертация ... кандидата технических наук. / Л.Н. Демина. - Красноярск. КГТЭИ, 2007. -170 с.

32. Ефремов, А.А. Метод исчерпывающей гидропародистилляции при получении эфирных масел дикорастущих растений. / А.А. Ефремов // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 7 – С. 88-94

33. Савенко, А.В. Получение экстрактов листьев крапивы двудомной и березы повислой в вибрационном аппарате / А.В. Савенко, А.Ф. Сорокопуд, В.В. Гриценко // Техника и технология пищевых производств. - 2015. - №3. - С. 101-108.

34. Первышина, Г.Г. К вопросу комплексного изучения березы повислой (*Betula pendula roth.*), произрастающей в Красноярском крае. / Г.Г. Первышина, А.А. Ефремов, Г.П. Гордиенко, Е.А. Агафонова, И.С. Губанова, О.В. Гоголева // Химия растительного сырья. -2002. -№3. – с.17-20.

35. Голованчиков, А.Б. Экспериментальное исследование экстрагирования пигментного полимерного комплекса из березового гриба чаги. / А.Б. Голованчиков, Н. В. Грачева, Н. Н. Дикарева. // Известия Волгоградского государственного технического университета. - 2013. -№3. -С. 115-118.

36. Грачева, Н.В. Интенсификация процесса экстракции березового гриба чага в электрическом поле постоянного тока. / Н.В. Грачева, А. Б. Голованчиков // Известия Волгоградского государственного технического университета. -2011. -№1. -С.82-86.

37. Кузнецова, О.Ю. Модернизированная схема комплексной переработки чаги. / О.Ю.Кузнецова // Фармация. -2016. -№3. –с.34-36

38. Бурмасова, М.А. Экстракция водного извлечения гриба чаги диэтиловым эфиром / М.А. Бурмасова, М.А. Сысоева // Башкирский химический журнал. -2012. -№2. -С.50-52.

39. Сысоева, Е.В. Свойства водных извлечений и меланинов чаги, полученных с применением СВЧ – поля. диссертация ... кандидата химических наук / Е.В. Сысоева - Казань. КГТУ, 2011. -135 с.

©А.В. Сафина - канд.техн.наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: olambis@rambler.ru; Д. М.Сайфутдинов - магистрант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: whatalovelyday@mail.ru; Р.Г. Сафин – д-р.техн.наук, профессор кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: safin@kstu.ru; А.Р. Хайрутдинова - магистрант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: hayrutdinova1995@mail.ru; К.В. Валеев - магистрант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: kirvall16@mail.ru; Л.Ш. Асаева - студент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: leisanasaeva@mail.ru; Д. А. Шайхутдинова - магистрант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: dilia_shaihi@mail.ru.

УДК 674.816.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ В ДИМЕТИЛОВЫЙ ЭФИР

Л.М. Исмагилова, А.Р. Садртдинов, Н.Ф. Тимербаев

Анализ современных технологий показывает, что перспективным и наиболее эффективным является переработка древесных отходов посредством газификации в синтез-газ, который может быть использован в химической промышленности при синтезе таких продуктов как диметиловый эфир. Однако совмещение процессов газификации древесных отходов и каталитического синтеза диметилового эфира усложняет прогнозирование состава синтез-газа и качества диметилового эфира, что требует специального подхода к организации технологического процесса и к проектированию оборудования. Поэтому проведение исследований, позволяющих эффективно перерабатывать древесную биомассу с последующим синтезом моторного топлива, в том числе диметилового эфира, является актуальной задачей. Исходя из сказанного, в работе было проведено теоретическое и экспериментальное исследование процесса термохимической переработки древесного сырья в диметиловый эфир и получены данные по технологическим режимам эксплуатации оборудования. При этом было дано описание процесса термохимической конверсии древесного сырья в диметиловый эфир, приведена математическая модель данного процесса, представлены результаты исследования влияния процесса высокотемпературной обработки, температуры и давления процесса синтеза на выход диметилового эфира. Представлены рекомендации по оптимальным параметрам сырья и режимам проведения процесса конверсии древесного сырья в диметиловый эфир.

Ключевые слова: древесное сырье, термохимическая переработка, диметиловый эфир, синтез-газ, газификация, математическая модель, исследование, рекомендация.

Analysis of modern technologies shows that the most promising and most effective is the processing of wood waste through gasification into synthesis gas, which can be used in the chemical industry in the synthesis of products such as dimethyl ether. However, combining the processes of gasification of wood waste and catalytic synthesis of dimethyl ether complicates the prediction of the composition of synthesis gas and the quality of dimethyl ether, which requires a special approach to the organization of the technological process and to the design of equipment. Therefore, carrying out studies that allow efficient processing of wood biomass with subsequent synthesis of motor fuel, including dimethyl ether, is an urgent task. Proceeding from what has been said, the work carried out a theoretical and experimental study of the process of thermochemical processing of wood raw materials in dimethyl ether and obtained data on the technological modes of operation of equipment. A description of the process of thermochemical conversion of wood raw materials to dimethyl ether was given, a mathematical model of this process was given, the results of a study of the effect of the high-temperature treatment process, temperature and pressure of the synthesis process on the yield of dimethyl ether were presented. Recommendations on the optimal parameters of raw materials and regimes for carrying out the process of conversion of wood raw materials to dimethyl ether are presented.

Key words: wood materials, thermochemical processing, dimethyl ether, synthesis gas, gasification, mathematical model, research, recommendation.

Введение

В виду сокращения запасов ископаемого органического сырья в последние годы во всем мире уделяется особое внимание вопросам химической, термохимической и биотехнологической переработке древесной биомассы, так как в отличие от ископаемых источников запасы древесины возобновляются. Также повышенный спрос на такие технологии связан с ростом количества образующихся отходов [1-3]. Анализ потребления древесины показывает, что ее заготовка и переработка сопровождаются побочными продуктами в виде

отходов, которые составляют до 50% всей перерабатываемой древесины, большая часть которых сжигается или вывозится в отвал [4-7]. В настоящее время эффективная утилизация древесных отходов становится более актуальной в свете сохранения природной среды. В то же время любое предприятие отрасли заинтересовано в том, чтобы утилизация древесных отходов из статьи затрат перешла в статью доходов [8-12].

Перспективным и наиболее эффективным является переработка древесных отходов в синтез-газ, который может быть использован в

химической промышленности при синтезе таких продуктов как диметиловый эфир, является газификация [13, 14]. Однако при совмещенных процессах газификации древесных отходов и каталитического синтеза диметилового эфира усложняется прогнозирование регулирующих параметров и конструктивных особенностей установки. Зависимость состава синтез-газа и качества диметилового эфира от параметров вышеуказанных процессов требует специального подхода к организации технологического процесса и проектированию оборудования [15-19]. Поэтому разработка технологий, позволяющих эффективно перерабатывать древесную биомассу с последующим синтезом моторного топлива, в том числе диметилового эфира, является актуальной задачей.

Исходя из сказанного, целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование процесса термохимической переработки древесного сырья в диметиловый эфир и получение данных по конструктивным размерам оборудования и технологическим режимам эксплуатации. В качестве основных

исходных данных приняты характеристики древесного сырья, вид газифицирующего агента, вид катализатора, температура и давление процесса.

Формализация и математическое описание процесса

С целью осуществления теоретических исследований было проведено математическое моделирование процесса. Для удобства и упрощения разработки математической модели, была составлена схема установки для переработки древесных отходов в диметиловый эфир (рис. 1). Схема отражает физические и химические процессы, протекающие во время работы установки и основные режимные параметры. На схеме можно выделить два основных блока. Первый блок характеризует термохимическую переработку древесных отходов в синтез-газ, за счет совмещения процессов высокотемпературной обработки и газификации. Второй блок включает процесс одностадийного каталитического синтеза диметилового эфира из синтез-газа, полученного в первом блоке.

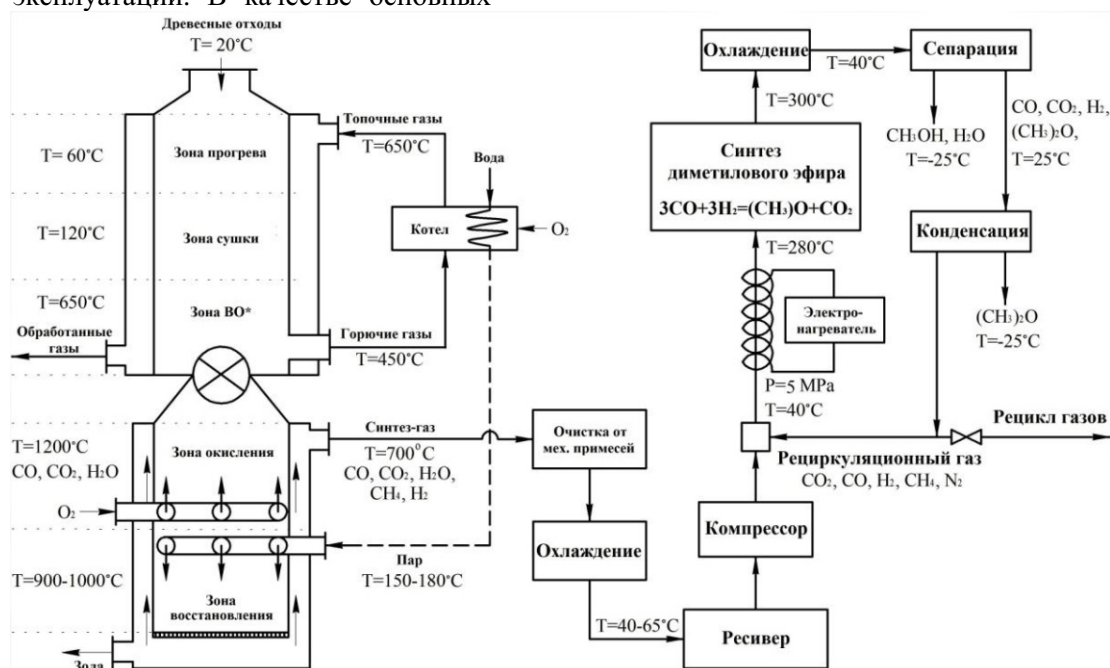


Рис. 1. Схема установки для переработки древесных отходов в диметиловый эфир и физическая картина технологического процесса

В первом блоке древесные частицы последовательно проходят различные стадии: прогрев-сушка, высокотемпературной обработки, окисление и стадию восстановления. Далее образованный синтез-газ для достижения

требуемых параметров, проходит стадии очистки от механических примесей, подвергается охлаждению и конденсации водяного пара. В результате в первом блоке при термической переработке древесных отходов

образуется сырье – синтез-газ, который в дальнейшем используется во втором блоке для одностадийного каталитического синтеза диметилового эфира.

В качестве катализатора для синтеза диметилового эфира рекомендован набор катализаторов Katalco-58 (состав: $\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) и γ - Al_2O_3 . Смесь катализаторов укладывается в три слоя: первый слой - Katalco-58; второй слой – смесь Katalco-58 и γ - Al_2O_3 ; третий слой γ - Al_2O_3 [20, 21]. В процессе каталитического синтеза протекают реакции образования метанола и его дегидратация в диметиловый эфир. Данный процесс является экзотермическим и протекает с уменьшением объема, поэтому необходимо постоянное поддержание температуры и давления в требуемых пределах [22, 23].

Полученную смесь продуктов на выходе из реактора синтеза охлаждают и разделяют на две фазы: жидкую и газовую. Жидкая фаза состоит из метанола и воды, а газовая фаза содержит диметиловый эфир, который выделяется на стадии конденсации. Не сконденсировавшиеся газы смешиваются с исходным синтез-газом и снова подаются в реактор.

Из описания технологического процесса следует, что процессы термохимической переработки древесных отходов в диметиловый эфир в совокупности сложны для математического описания. Это обусловлено сложной химической структурой древесных отходов и влиянием на процесс каталитического синтеза диметилового эфира компонентного состава синтез-газа [24-26]. Поэтому получение качественного синтез-газа в качестве сырья для синтеза диметилового эфира имеет важное значение.

С учетом описания схемы установки и физической картины технологического процесса (рис. 1), в начале рассмотрен технологический блок, включающий совокупность процессов прогрева, сушки и высокотемпературной обработки одной условной частицы цилиндрической формы. Изменение температуры частицы при данных процессах описывается дифференциальным уравнением теплопереноса [27, 28]

$$\rho_q \cdot c_q \cdot \frac{\partial T_q}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial l} \cdot \left(\lambda_q \frac{\partial T_q}{\partial l} \right) + q_q, \quad (1)$$

где ρ_q и c_q – плотность и теплоемкость частицы соответственно; λ_q – коэффициент теплопроводности частицы; q_q – сток (приток) тепла, который определяется прогревом частицы, испарением влаги при сушке и химическими реакциями при высокотемпературной обработке

Для решения дифференциального уравнения (1) сформулированы начальные и граничные условия:

$$T_q(0, l) = T_q^0, \quad (2)$$

$$-\lambda_q \frac{\partial T_q}{\partial \tau} \Big|_{l=0} = \alpha(T_z - T_q), \quad (3)$$

где температура газов (T_g) определяется из следующего уравнения:

$$T_z = \frac{q \cdot C_z}{\rho \cdot c}. \quad (4)$$

При рассмотрении стадии сушки тепловой поток ($q_{усл}$) на испарение влаги будет определяться выражением

$$q_{усл} = r \cdot j = r \cdot \frac{m_q}{F} \cdot \frac{\partial W_q}{\partial \tau} \Big|_{l=0} = r \cdot \frac{\rho_q}{f_q} \cdot \frac{\partial W_q}{\partial \tau} \Big|_{l=0}, \quad (5)$$

где r – теплота парообразования; j – поток влаги с поверхности частицы; W_q – влагосодержание частицы; f_q – удельная поверхность частицы.

В результате некоторых преобразований стадия сушки будет описываться системой дифференциальных уравнений

$$c_q \cdot \rho_q \cdot \frac{\partial T_q}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial l} \left(\lambda_q \cdot \frac{\partial T_q}{\partial l} \right) + r \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial W_q}{\partial \tau}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial W_q}{\partial \tau} = \frac{k_p}{\rho_0} \left(\frac{\partial^2 P_q}{\partial l^2} \right). \quad (7)$$

Начальные и граничные условия для решения системы уравнений (6) - (7) запишутся следующим образом

$$W_q(0, l) = W_q^0, \quad (8) \quad P_q(0, l) = P_{атм}, \quad (9)$$

$$T_q(0, l) = T_q^0, \quad (10) \quad P_q|_{l=L} = P_q, \quad (11)$$

а граничные условия по температуре запишутся аналогично выражению (3).

Описание стадии высокотемпературной обработки осуществляется на основании принятой схемы термического разложения древесины. В результате уравнения изменения массы вещества запишутся в следующем виде [29, 30].

Для исходной древесины:

$$\frac{\partial m_{op}}{\partial \tau} = (-k_1 + k_2) \cdot m_{op} \quad (12)$$

Для промежуточного вещества:

$$\frac{\partial m_{ne}}{\partial \tau} = k_2 \cdot m_{op} - k_3 \cdot m_{ne} \quad (13)$$

Для продукта:

$$\frac{\partial m_n}{\partial \tau} = \gamma \cdot k_3 \cdot m_{ne}, \quad (14)$$

где γ – массовая доля продукта, m_{op} , m_{ne} , m_n – удельная масса древесины, промежуточного вещества и продукта соответственно, k_i – константа скорости химической реакции, определяемая по закону Аррениуса.

Изменения массы в единице объема газовой фазы может быть выражено за счет конвекции и реакций пиролиза

$$\frac{\partial(m_z \varepsilon)}{\partial \tau} + \frac{\partial(v_z m_z)}{\partial l} = (1 - \gamma) \cdot k_3 \cdot m_{ne} \quad (15)$$

С учетом уравнения (15) и предположения, что газы ведут себя как идеальный газ, получаем уравнение изменения давления газа

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\varepsilon \cdot P_z}{T} \right) = \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{B \cdot P_z}{\mu T} \right) + \frac{R}{M_z} \cdot S_z, \quad (16)$$

где S_z – массообразование газа; R и M – универсальная газовая постоянная и молекулярный вес; μ – динамическая вязкость газа [31, 32]; B – газовая проницаемость.

Уравнение сохранения энергии для стадии высокотемпературной обработки запишется в виде

$$\begin{aligned} & (c_{op}^0 \cdot m_{op} + c_{op}^0 \cdot m_{ne} + c_n \cdot m_n + \varepsilon \cdot c_{pz} \cdot m_z) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} + C_{pz} \cdot m_z \cdot v \cdot \frac{\partial T}{\partial l} = \\ & = \frac{\partial T}{\partial l} \left(\lambda_q \frac{\partial T}{\partial l} \right) - (k_1 \cdot \Delta \alpha_1 + k_2 \cdot \Delta \alpha_2) \cdot m_{op} + k_3 \cdot m_{ne} \cdot \Delta \alpha_3, \end{aligned} \quad (17)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, определяемый через критерий Нуссельта; v – скорость.

Для решения системы уравнений (12) - (17) сформулированы начальные условия (18) - (23). Граничные условия по давлению запишутся как (24) исходя из уравнения состояния идеального газа [33, 34], а граничные условия по температуре запишутся аналогично выражению (3).

$m_{op}(0, l) = m_{op}^0$,	(18)	$T_q(0, l) = T_q$,	(22)
$m_{ne}(0, l) = 0$,	(19)	$P_q(0, l) = P_{атм}$,	(23)
$m_n(0, l) = 0$,	(20)	$\frac{\partial P_z}{\partial l} \Big _{l=L} = v \cdot \frac{\partial(v \cdot m_z)}{\partial l}$	(24)
$m_z(0, l) = 0$,	(21)		

При рассмотрении стадии окисления, с учетом принятых допущений уравнения изменения массы продукта и концентраций компонентов реакций запишутся в виде

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = -k_i \cdot C_i, \quad (25)$$

$$\frac{\partial m_n}{\partial \tau} = -m_n \cdot \sum_{m=1}^z k_i, \quad (26)$$

при этом

$$\frac{\partial T_n}{\partial \tau} = \frac{\partial T_z}{\partial \tau}. \quad (27)$$

Тогда уравнение сохранения энергии для продукта запишется следующим образом

$$\rho_n \cdot c_n \cdot \frac{\partial T_n}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^z (q_i \cdot k_i (C_{i0} - C_i)), \quad (28)$$

где C_{i0} , C_i – начальная и относительная концентрации i -го вещества; z – количество параллельно протекающих реакций.

Для решения системы уравнений (25) - (28) приняты начальные (29) - (33) и граничные (34) - (36) условия:

$$T_z = T_n = T_q^0, \quad (29)$$

$$m_n = m_n^0, \quad (30)$$

$$C_{(CO_2)} = 0, \quad (31)$$

$$C_{(CO)} = 0, \quad (32)$$

$$C_{(O_2)} = C_{(O_2)}^0, \quad (33)$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial y} \Big|_{y=0} = T_n, \quad (34)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial y} \Big|_{y=0} = C_{i0} \quad (35)$$

$$\frac{\partial m_n}{\partial y} \Big|_{y=0} = m_n^0. \quad (36)$$

Стадия восстановления описывается следующей системой уравнений теплопроводности

$$v_{zn} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial y} = -k_i \cdot C_i, \quad (37)$$

$$v_n \cdot \frac{\partial m_n}{\partial y} = -m_n \cdot \sum_{m=1}^z k_i, \quad (38)$$

$$\rho_{zn} \cdot c_{zn} \cdot w_{zn} \cdot \frac{\partial T_{zn}}{\partial y} = -\alpha_{zn} \cdot (T_n - T_{zn}) \cdot f + \sum_{i=1}^z (q_i \cdot k_i \cdot (C_{i0} - C_i)) \quad (39)$$

$$\rho_n \cdot c_n \cdot v_n \cdot \frac{\partial T_n}{\partial y} = \alpha_{zn} \cdot (T_n - T_{zn}) \cdot f - \sum_{i=1}^z (q_i \cdot k_i \cdot (C_{i0} - C_i)). \quad (40)$$

Для решения системы уравнений (37) - (40) приняты следующие начальные условия:

$$T_n = T_n^0, \quad (41) \quad C_{(O_2)} = C_{(O_2)}^0, \quad (45)$$

$$T_c = T_c^0, \quad (42) \quad C_{(H_2)} = 0, \quad (46)$$

$$C_{(CO_2)} = C_{(CO_2)}^0, \quad (43) \quad C_{(H_2O)} = 0, \quad (47)$$

$$C_{(CO)} = C_{(CO)}^0, \quad (44) \quad m_n = m_n^0, \quad (48)$$

а граничные условия по температуре и массе записаны в виде

$$-\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial y} + v_{zn} \frac{\partial T_n}{\partial y} + \sum_{i=1}^z q_i \cdot k_i \cdot (C_{i0} - C_i) = T_n^0, \quad (49)$$

$$\left. \frac{\partial T_n}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial T_c}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad (50)$$

$$v_n \frac{\partial m_n}{\partial y} = - \sum_{i=1}^z k_i \cdot C_i. \quad (51)$$

Процесс получения диметилового эфира из синтез-газа, согласно описанию процесса, протекает на смеси различных катализаторов. Исходя из этого дифференциальные уравнения теплового и материального баланса, отражающие изменение потоков ключевых компонентов: CO , CO_2 , CH_3OH , C_2H_6O на различных катализаторах, запишутся в виде [22, 35]:

$$\frac{dX_i}{d\tau} = \omega_{ik} (1 - \varepsilon_k), \quad (52),$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{-1}{\sum X_i c_{pi} \left(\sum \Delta H_{rk} \omega_k (1 - \varepsilon_{mk}) + \sum \Delta H_{rk} \omega_k (1 - \varepsilon_k) - KS_x (T - T_x) \right)} \quad (53),$$

где c_{pi} – истинная теплоемкость компонентов; K – коэффициент теплопередачи; S_x – площадь охлаждающей поверхности; T – температура потока в реакционной зоне; T_x – температура охлаждающей среды; ΔH_{rk} – изменение энтальпии системы за счет протекания реакции по k – ой реакции на данном катализаторе; ω_k – скорость реакций.

Начальные условия для решения системы уравнений (54) - (56) примут вид

$$\tau = 0 \quad (54), \quad C_i^{nov} = C_{i0} \quad (55), \quad T = T_0 \quad (56),$$

а условие равенства скорости переноса вещества скорости химической реакции на катализаторе запишется в виде [36-38]

$$\beta_i S_k (C_i^{nov} - C_i) = (1 - \varepsilon_k) \omega_{ik}, \quad (57)$$

где β – коэффициент массоотдачи, м/с; S_k – поверхность слоя катализатора, м²/м³; ε_k – порозность слоя катализаторов.

Результаты и обсуждение

Составленная математическая модель, основанная на системе дифференциальных уравнений, дает возможность изучить процессы, протекающие на стадиях прогрева, сушки, высокотемпературной обработки, газификации и каталитического синтеза целевого продукта – диметилового эфира, а также их взаимосвязь. Проверка адекватности разработанного математического описания проводится с помощью сравнения расчетных и экспериментальных данных. Результаты исследований представлены на рис. 2-4, на которых сплошными линиями обозначены данные, полученные расчетным путем, а точками и пунктирными линиями – экспериментальные значения.

На рис. 2а представлена зависимость убыли удельной массы от продолжительности процесса высокотемпературной обработки щепы, которая показывает, что при увеличении продолжительности процесса массовый выход продукта падает. Это объясняется выделением летучих веществ, содержащихся в продукте. Также из зависимости видно, что с увеличением продолжительности процесса содержание нелетучего углерода в массе сырья возрастает, т.е. концентрация углерода увеличивается за счет удаления летучих веществ из общей массы сырья. Отмечено, что на конечную концентрацию нелетучего углерода в сырье значительно влияют высокие значения, как продолжительности, так и температуры процесса. Такие показатели приводят к наиболее интенсивному и полному удалению летучих из общей массы сырья.

Проведены аналогичные исследования с использованием дробленки (рис. 2б). Анализ результатов выполненных экспериментальных исследований показывает, что с уменьшением размера древесных частиц убыль удельной массы увеличивается. Это объясняется плотным расположением частиц в слое, что предполагает передачу тепла, за счет большого коэффициента теплопроводности, чем у слоя с крупными частицами. Сравнивая графические данные, изображенные на рис. 2а и рис. 2б, можно сказать, что выход промежуточного продукта из крупнофракционного сырья намного больше чем из мелкофракционного, но при этом его качество, выражающееся содержанием нелетучего углерода, отличается.

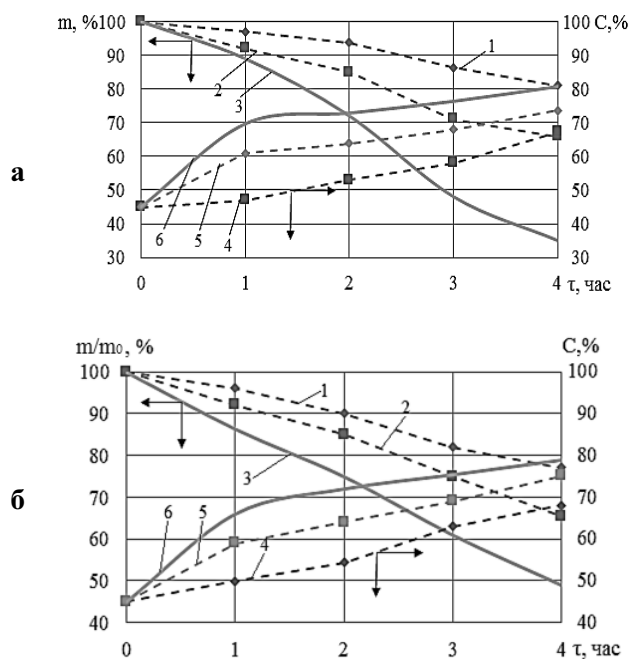


Рис. 2. Зависимость убыли удельной массы (кривые 1-3) и содержание нелетучего углерода (кривые 4-6) от продолжительности процесса высокотемпературной обработки древесных частиц: а - щепа с влажностью 22%; б – дробленка с влажностью 33%, при различной температуре: 1; 4 – 250 °С, 2; 5 – 350 °С, 3; 6 – 450 °С

Далее было рассмотрено влияние давления на конверсию СО и выход ДМЭ при температуре 260 °С и соотношении $H_2/CO=1$ (рис. 3). Как отмечается, при росте давления в диапазоне от 3 до 6 МПа конверсия СО увеличиваются, содержание CO_2 в потоке продуктов уменьшается, и выход ДМЭ увеличивается. Дальнейший рост давления способствует гидрогенизации легких олефинов. Изучение влияния других образцов синтез-газа на выход диметилового эфира проводилось расчетным путем, что позволило выявить разницу в данных и определить оптимальное давление синтеза ДМЭ – 5 МПа.

На рис. 4 показано влияние температуры на конверсию СО и выход ДМЭ. При низкой температуре конверсия СО и выход ДМЭ малы, но с увеличением температуры эти величины начинают расти. Наибольший выход ДМЭ (27%) получается в диапазоне 220-280 °С, а конверсия СО в данном диапазоне равен 72%. Выше 260 °С происходит снижение обеих величин. Это объясняется преобладанием реакции гидрокрекинга, что приводит к образованию воды, которая реагирует с СО и увеличивает количество CO_2 . В данном случае также видно незначительная разница выхода ДМЭ при различных соотношениях H_2/CO .

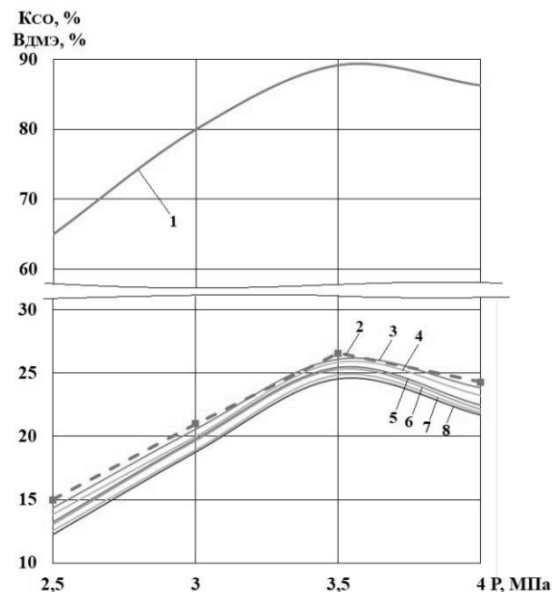


Рис. 3. Влияние давления на конверсию СО (1) и выход ДМЭ при температуре $t=260^{\circ}C$: при $H_2/CO=1$ (2); $H_2/CO=0,9$ (3); $H_2/CO=0,85$ (4); $H_2/CO=0,83$ (5); $H_2/CO=0,78$ (6); $H_2/CO=0,8$ (7); $H_2/CO=0,75$ (8)

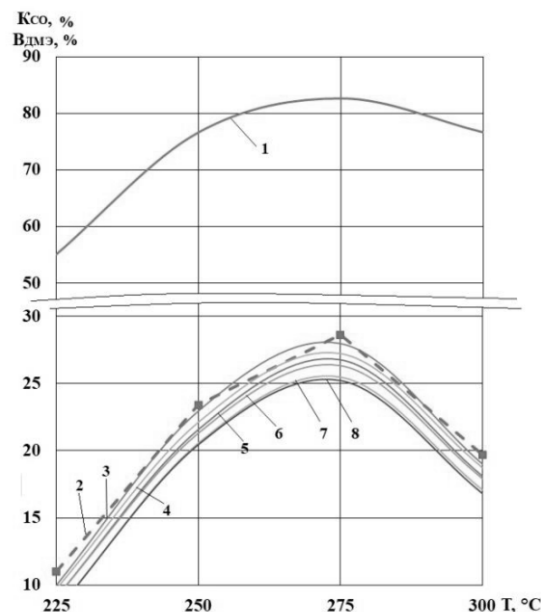


Рис. 4. Влияние температуры на конверсию СО (1) и выход ДМЭ при давлении 5 МПа: при $H_2/CO=1$ (2); $H_2/CO=0,9$ (3); $H_2/CO=0,85$ (4); $H_2/CO=0,83$ (5); $H_2/CO=0,78$ (6); $H_2/CO=0,8$ (7); $H_2/CO=0,75$ (8)

Закключение

Проделаны теоретические и экспериментальные исследования процесса термохимической переработки древесного сырья в диметилловый эфир. По результатам анализа экспериментальных и расчетных данных найдены оптимальные режимные параметры процессов и данные для разработки аппаратного оформления совмещенных процессов переработки древесного сырья -

путем высокотемпературной обработки, газификации и каталитического синтеза диметилового эфира. В результате были получены оптимальные параметры сырья и режимы проведения процесса конверсии древесного сырья в диметиловый эфир. Такие как фракционный состав сырья – щепы, дробленки; влажность сырья составляет от $30\pm 3\%$ до $40\pm 3\%$; температура процесса высокотемпературной обработки – 350°C , 450°C ; продолжительность процесса высокотемпературной обработки – 2 часа. Расход окислителя при парокислородной газификации составляет $0,34 \text{ м}^3/\text{кг}$, при парокислородно-воздушной газификации – $0,65 \text{ м}^3/\text{кг}$, расход водяного пара – $0,4 \text{ кг}/\text{кг}$. Для синтеза диметилового эфира рекомендован состав катализаторов $\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ с температурой синтеза – $255\text{--}270^\circ\text{C}$ и давлением – $4,5\text{--}5,5 \text{ МПа}$.

Расхождение между результатами теоретического расчета и экспериментальных исследований составило около 14%, что связано со сложностью математической модели и принятыми допущениями.

Литература

1. Safin, R.R. Research of heating rate while thermo modification of wood / R.R. Safin, R.R. Khasanshin, A.R. Shaikhutdinova, A.V. Safina // *World Applied Sciences Journal*. – 2014. – Т.30. – №11. – С. 1618–1621.
2. Fomin, A.A. Dispersion of the margin removed in complex milling / A.A. Fomin, V.G. Gusev, R.G. Safin, R.R. Safin // *Russian Engineering Research*. – 2015. – Т.35. – №6. – С. 417–420.
3. Тунцев, Д.В. Разработка комплексной технологии термохимической переработки древесных отходов / Д.В. Тунцев, А.М. Касимов, Р.Г. Хисматов, И.С. Романчева, А.С. Савельев // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2014. – №4. – С. 50–55.
4. Тунцев, Д.В. Ресурсосбережение при утилизации отработанных деревянных шпал / Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, Р.Г. Хисматов, М.Р. Хайруллина, Э.Е. Антипова, И.Ф. Гараева // *Вестник казанского технологического университета*. – 2015. – Т.18, №5. – С. 248–250.
5. Грачев, А.Н. Использование отходов деревообрабатывающих предприятий в качестве дополнительного источника тепловой энергии / А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров, Р.Г. Сафин // *Химико–лесной комплекс – проблемы и решения: тезисы докл. Всерос. научно–практ. конф.* – Красноярск, 2002. – Т.II. – С. 286–288.
6. Садртдинов, А.Р. Тенденции образования и потенциал использования отходов растительного происхождения лесопромышленного и агропромышленного комплексов / А.Р. Садртдинов, Р.Г. Сафин, Л.М. Исмагилова, Т.Х. Галеев, Г.Р. Мингалеева // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2017. – №2. – С. 8–17.
7. Гашо, Е.Г. Три порога энергоэффективности // *Энергия: экономика, техника, экология*. – 2009. – №3. – С. 16–20.
8. Зиятдинова, Д.Ф. Совершенствование технологий переработки древесных материалов, сопровождающейся выделением парогазовой фазы. — Казань: КНИТУ, 2009. — 139 с.
9. Prosvirnikov, D.B. Multifactorial modelling of high-temperature treatment of timber in the saturated water steam medium / D.B. Prosvirnikov, R.G. Safin, D.F. Ziatdinova, N.F. Timerbaev, V.A. Lashkov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Т.124 – №1. – С. 012088
10. Galyavetdinov, N.R., The usage of wood wastes in the manufacture of composite materials / N.R. Galyavetdinov, R.R. Khasanshin, R.R. Safin, R.G. Safin, E.Y. Razumov // *In 2015 Int. Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management*. – 2015. – Т.1. – №4. – С. 779–786.
11. Lashkov, V.A. Heating of production wood chips in a saturated-steam medium // V.A. Lashkov, E.I. Levashko, R.G. Safin // *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*. – 2001. – Т.74. – №1. – С. 80–83.
12. Хузеев, М.В. Паровая конверсия древесного угля / М.В. Хузеев, З.Г. Саттарова, В.И. Петров // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – Т.17. – №1. – С.94–96.
13. Тимербаев, Н.Ф. Комплексная энерготехнологическая переработка древесных отходов с применением прямоточной газификации: монография - Казань: КНИТУ, 2011. - 252 с.
14. Galyavetdinov, N.R. The mathematical modeling of the wood greenery extraction processes / N.R. Galyavetdinov, R.R. Safin, A.E. Voronin, A.R. Shaikhutdinova // *In 2015 Int. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*. – 2015. – С. 1–5.
15. Садртдинов, А.Р. Разработка опытно-промышленного образца установки по

утилизации древесных отходов с получением диметилового эфира / А.Р. Садртдинов, Л.М. Исмагилова // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т.18. – № 9. – С. 131-133.

16. Tuntsev, D.V. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste / D.V. Tuntsev, R.R. Safin, R.G. Hismatov, R.A. Halitov, V.I. Petrov // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. - 2015, art. no. 7414929.

17. Sadrtidinov, A.R. The mathematical description of the gasification process of woody biomass in installations with a plasma heat source for producing synthesis gas // A.R. Sadrtidinov, R.G. Safin, M.K. Gerasimov, V.I. Petrov, K.K. Gilfanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Т.124. – №1. – С. 012092

18. Хисматов, Р.Г. Установ ка переработки низкокачественной древесины в уголь / Р.Г. Хисматов, Е.В. Хисматова, Д.В. Тунцев, М.Р. Хайруллина, А.С. Савельев, И.С. Романчева // Вестник казанского технологического университета. – 2014. – Т.17. – №22. – С. 297-300.

19. Садртдинов, А.Р. Получение древесного угля и жидких продуктов / А.Р. Садртдинов, И.И. Хуснуллин, З.Г. Саттарова. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2012. – №1. – С.4-6.

20. Косова Н.И. Каталитический одностадийный процесс получения диметилового эфира из синтез-газа / Н.И. Косова, Л.Н. Курина // Химия в интересах устойчивого развития. – 2011. – Т.19. – С. 211–215.

21. Takashi Ogawa Direct Dimethyl Ether Synthesis / Takashi Ogawa, Norio Inoue, Tutomu Shikada, Yotaro Ohno// Journal of Natural Gas Chemistry. – 2003. – №12. – С. 219-227.

22. Sadrtidinov, A.R. Mathematical modeling for the development of equipment for thermochemical processing of wood waste in to dimethyl ether // A.R. Sadrtidinov, L.M. Esmagilova, V.A. Saldaev, Z.G. Sattarova, A.A. Mokhovikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. Т.142. – №1. – С. 012094

23. Сафин, Р.Г. Разработка технологии переработки высоковлажных древесных отходов в высокооктановые компоненты моторного топлива / Р.Г. Сафин,

Н. Ф. Тимербаев, А.Р. Садртдинов, Д.Б. Просвириков // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т.16. – №7. – С. 250-254.

24. Lashkov, V.A. Modeling of a reduction zone of the gasifier installation / V.A. Lashkov, Z.G. Sattarova, M.A. Taymarov, M.K. Gerasimov, R.A. Halitov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Т.124. – №1. – С. 012111

25. Тимербаев, Н.Ф. Технологии газификации древесины: перспективы и инновации / Н.Ф. Тимербаев, А.Р. Садртдинов, И.Н. Ковернинский, Л.Р. Смирнова, Т.Х. Галеев, Д.А. Ахметова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т.17. – №15. – С. 221-226.

26. Садртдинов, А.Р. Влияние предварительной тепловой обработки древесных отходов на процесс газификации и качество синтез газа / А.Р. Садртдинов, А.Н. Николаев, А.С. Торопов, В.А. Салдаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т.17. – №1. – С. 89-90.

27. Safin, R.G. Mathematical model of vacuum-oscillating drying of lumber // R.G. Safin, V.A. Lashkov, L.G. Golubev, R.R. Safin // Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal. – 2002. – Т.75. – №2. – С. 95-98.

28. Тунцев, Д.В. Математическое моделирование газификации жидкого продукта контактного пиролиза древесины / Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, А.М. Касимов, Р.Г. Хисматов, И.С. Романчева, А.С. Савельев // Вестник казанского технологического университета. – 2015. – Т.18. – №6. – С. 168-172.

29. Альтшулер, В.С. Термодинамика процессов получения газов заданного состава из горючих ископаемых / В.С. Альтшулер, Г.В. Клириков, В.А. Медведев. – М.: Гослесбумиздат, 1969. – 247 с.

30. Головина, Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.

31. Safin, R. Development of the energy-saving technology of thermal modification of wood in saturated steam / R. Safin, Š. Barčík, A. Shaikhutdinova, A. Safina, P. Kaynov, E. Razumov // Acta Facultatis Xylogologiae. – 2015. – Т.57. – №2. – С. 39-47.

32. Drapalyuk, M.V. Modeling the digging process of tree root system by the mechanism with hydropulse drive / M.V. Drapalyuk, P.I. Popikov R.V. Yudin, A.A. Fomin, R.V. Chernukhin // IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016, – Т.142. – №1. – С. 012090

33. Садртдинов, А.Р. Совершенствование техники и технологии процесса газификации отходов деревообработки: дис. канд. тех. наук // Казань. 2011. – 139 с.

34. Хузеев, М.В. Паровая конверсия древесного угля / М.В. Хузеев, З.Г. Саттарова, В.И. Петров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т.17. – №1. – С.94-96.

35. Сафин, Р.Р. Математическое моделирование процесса пиролиза древесины при регулировании давления среды / Р.Р.

Сафин, Р.Г. Сафин, Н.А. Валеев // Вестник Моск. ун-та леса. – 2005. – №2. – С. 168-174.

36. Timerbaev, N.F. Modeling of the process of energy-technological treatment of wood waste by method of direct-flow gasification / N.F. Timerbaev, R.R. Safin, R.G. Safin, D.F. Ziatdinova // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2014. – Т.9. – №5. – С. 141-146.

37. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки / В.М. Потехин, В.В. Потехин. — СПб.: Лань, 2014. — 896 с.

38. Мухина, Т.Н. Пиролиз углеводородного сырья. – М.: Химия, 1987. – 240 с.

©Л.М. Исмагилова - аспирант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: pdm.kstu@gmail.com; А.Р. Садртдинов – канд.техн.наук, доцент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: almaz.sadrtdinov@gmail.com; Н.Ф. Тимербаев – д-р.техн.наук, профессор кафедры возобновляемых источников энергии, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», e-mail: cpekgeu@gmail.com

УДК 662.765.1

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

Е.М. Кашин, В.Н. Диденко

Метод основан на уравнениях материального баланса веществ (соединений) и теплового баланса системы. Метод позволяет вычислить выход, концентрации компонентов генераторного газа, определить расход топлива и воздуха, а также ряд других характеристик работы газогенератора.

Ключевые слова: концентрация компонента газа, уравнение баланса углерода, уравнение баланса водорода, уравнение баланса кислорода, уравнение баланса влаги.

The method is based on the equations of the material balance of substances (chemical compounds) and the equations of the thermal balance of system. The method allows to calculate the gas volume for per kg of fuel, concentrations of gas component, fuel and air consumption and other gasifier characteristics.

Key words: concentration of oxygen gas component, equation of carbon balance, equation of hydrogen balance, equation of oxygen balance, equation of water balance.

Введение

Состав генераторного газа зависит от схемы газификации. В прямой схеме влага и летучие, образующиеся в зонах сушки и пиролиза, примешиваются к получаемому генераторному газу и таким образом не участвуют в процессе газификации топлива. Считается, что в газогенераторе обращенной схемы абсолютно

все элементы топлива, включая влагу, участвуют в процессе образования газа. Газогенератор обращенного процесса по отношению к газогенератору прямой схемы обладает рядом преимуществ: работа на различных видах топлива, низкое содержание смол в продуктах газификации, загрузка топлива без остановки процесса газификации, сонаправленность

центробежных сил и потока генераторного газа (для газогенераторов роторного типа [1]). Общепринятым методом расчета состава газа обращенного процесса газификации является балансовый метод, основанный на составлении материального и теплового балансов по заданному составу топлива [2, 3, 4, 5]. Как показал анализ результатов расчетов по методу [2], он имеет ряд недостатков:

- результаты расчетов по методу [2], приведенные в таблице 1 не дают удовлетворительного согласования с опытными данными;

Таблица 1 - Сухой состав генераторного газа (%) по опытным данным Гинзбурга Д.Б. [3], Лямина В.А. [6], и расчетам по методике Юдушкина Н.Г. [2].

CO	CO_2	H_2	O_2	CH_4	N_2
Гинзбург Д.Б. [3]					
Топливо: береза с влажностью $W=28\%$					
27,5	7,6	11,4	0,4	1,9	50,8
Лямин В.А. [6]					
Топливо: береза с влажностью $W=15-20\%$					
30,8	4,3	5,6	0,3	1,4	57,6
Юдушкин Н.Г. [2]					
Топливо: береза с влажностью $W=28\%$ $T=1500K$, $K=2,49$					
19,1	11,4	16,6	-	1,5	51,45

- полагается, что влага диссоциирует на водород и кислород, хотя температура в древесных газогенераторах намного ниже $2000^\circ C$;

- не учитывается химическое взаимодействие продуктов газификации друг с другом и с углеродом вновь поступающего нагретого топлива в других температурных областях реальной активной зоны газификации;

- в явном виде не учитывается коэффициент избытка воздуха;

- содержание метана в продуктах газификации не определяется и в окончательных расчетах задается величиной $CH_4 = 1,5\%$;

- не учитывается влага воздуха, используемого в качестве газифицирующего агента;

- константа равновесия химической реакции водяного газа принимается средним значением (от 1,7 до 2,5) в достаточно широком диапазоне изменения температуры в реальной активной зоне газификации;

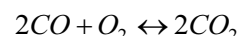
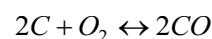
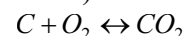
Перечисленные недостатки балансового метода [2] указывают на актуальность

создания нового метода расчета состава древесного генераторного газа.

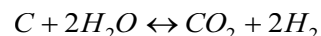
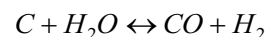
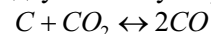
Методы и материалы

Авторами данной статьи разработан «Балансово-концентрационный» метод расчета состава древесного генераторного газа, который представляет совокупность модифицированного балансового метода [2] («Балансовая» часть) и добавленного метода расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций в активных зонах газификации с различными температурами («Концентрационная» часть). «Балансовая» часть определяет переход элементов твердого топлива и газифицирующего агента в газообразные составляющие древесного генераторного газа, а «Концентрационная» часть учитывает изменение концентраций этих газообразных составляющих древесного генераторного газа в результате химического взаимодействия между собой и углеродом топлива. В предлагаемом «Балансово-концентрационном» методе различают не одну, а три активные зоны газификации:

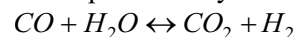
1) *окислительно-восстановительная зона*, где отдельно протекают окислительные процессы (образование окиси и двуокиси углерода путем окисления углерода топлива и повторно двуокиси углерода посредством окисления угарного газа)



и отдельно восстановительные процессы (образование водорода, окиси и двуокиси углерода путем восстановления углерода водяным паром и двуокисью углерода),

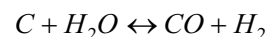
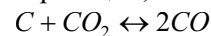


образующие вместе равновесную систему



Температура в окислительно-восстановительной зоне в зависимости от ее теплоизоляции составляет 60-85% от адиабатной температуры горения топлива.

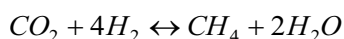
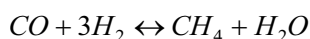
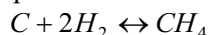
2) *восстановительная зона*, где из-за полного отсутствия окислителя проходят только восстановительные реакции;





Анализ изменений энергии Гиббса этих химических реакций показывает, что они останавливаются при температуре ниже $980^\circ C$, поэтому температура в восстановительной зоне выше $980^\circ C$.

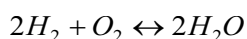
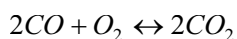
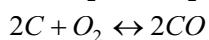
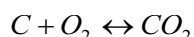
3) зона взаимодействия продуктов газификации между собой и с углеродом вновь поступающего нагретого топлива



Анализ изменений энергии Гиббса показывает, что данные химические реакции останавливаются при температуре выше $980^\circ C$, поэтому температура в зоне взаимодействия продуктов газификации друг с другом и с углеродом топлива ниже $980^\circ C$.

Включение реакций образования метана только в третью активную зону объясняется тем, что в двух других зонах температура слишком высока (более $980^\circ C$) и это препятствует самопроизвольному протеканию в них реакций образования метана.

При подаче в газогенератор избыточного воздуха ($\alpha > 1$) в первой зоне появляется избыточный кислород. Избыточный кислород окисляет как исходное сырье (топливо), так и продукты газификации - компоненты генераторного газа. Таким образом при $\alpha > 1$ в первой зоне дополнительно рассматриваются следующие реакции:



«Балансово-концентрационный» метод позволяет вычислить выход, концентрации компонентов генераторного газа, определить расход топлива и воздуха, а также ряд других характеристик работы газогенератора.

Объектом исследования являются концентрации компонентов генераторного газа в активных зонах газификации. Используются химическое сродство реагентов, уравнения материального баланса веществ и соединений, а также уравнения теплового баланса в газогенераторе.

В «балансовой» части предлагаемого метода рассматриваются реакции окислительно-восстановительной зоны, а реакции в других зонах (восстановительной, зоне взаимодействия продуктов газификации между собой и с углеродом топлива, учитываются в «Концентрационной» части разработанного авторами «Балансово-концентрационного» метода.

Результаты

В материальном балансе учитываются все вещества, вводимые и отводимые из газогенератора, включая влагу газа. Поэтому исходными составляющими материального баланса являются влажное топливо и воздух, а конечными – влажный генераторный газ, недожог и зола. Тепловой баланс составляется по низшей теплоте сгорания топлива, определяемой расчетным путем. Теплота химических реакций, подсчитывается в тепловом балансе и позволяет определить коэффициент полезного действия газогенератора.

Для удобства работы с малоразмерными коэффициентами уравнений расчет производится для 100 кмоль влажного генераторного газа. Генераторный газ в газогенераторе можно считать идеальным газом, поэтому объемное содержание компонентов в газе равно их мольному содержанию.

Состав генераторного газа принимается в следующем виде:

$$CO + CO_2 + CH_4 + H_2 + H_2O + N_2 + O_2^{изб} = 100\% \quad (1)$$

где $CO, CO_2, CH_4, H_2, H_2O, N_2, O_2$ – объемные (мольные) процентные содержания соответствующих газов (т.к. расчет производился для 100 кмоль влажного генераторного газа). Избыточный неизрасходованный кислород $O_2^{изб}$ присутствует в составе древесного генераторного газа только при $\alpha > 1$.

Метан CH_4 , как компонент генераторного газа, в данной части «Балансово-концентрационного» метода расчета отсутствует, так как в окислительно-восстановительной зоне заметно выше $980^\circ C$, а реакции образования метана при таких высоких температурах не идут.

Элементарный состав твердого органического топлива (по рабочей массе):

$$C^P + H^P + O^P + W^P + A^P = 100\% \quad (2)$$

где C^P, H^P, O^P, W^P, A^P – массовые процентные содержания элементов в исходном твердом органическом топливе.

Для определения содержания компонентов CO, CO_2, H_2, H_2O, N_2 в генераторном газе, его выхода $\nu_{B.G.}$ из 1 кг топлива и избыточного кислорода O_2 , требуется семь уравнений материального и теплового баланса процесса газификации, учитывающих константу равновесия газа для реакции образования водяного газа.

Высшая и низшая теплоты сгорания исходного рабочего твердого топлива определяется по формулам Д. И. Менделеева [2, 5, 7, 8, 9], $кДж/кг$:

высшая

$$Q_B^P = 340C^P + 1260H^P - 109(O^P - S^P) \quad (3)$$

низшая

$$Q_H^P = 340C^P + 1035H^P - 109(O^P - S^P) - 25W^P \quad (4)$$

Переход элементов топлива (C^P, H^P, O^P, W^P) и воздуха (O_2^B, N_2^B , влага) в генераторный газ осуществляется по четырем основным уравнениям материального баланса углерода, водорода, кислорода и влаги.

Баланс углерода заключается в том, что количество углерода до и после химических реакций не изменяется. Поэтому весь углерод C^P твердого топлива, за исключением потерь $\delta\%$, обусловленных недожогом в золе, переходит в газообразные компоненты CO и CO_2 .

Содержание C^P , выраженное в $кмоль$, вычисляется следующим образом. По закону Авогадро 1 $кмоль$ любого газа при нормальных физических условиях (температура $0^\circ C$ и давление 760 $мм рт. ст.$) занимает объем, равный 22,4 $м^3$, следовательно объем 100 $кмоль$ получаемого генераторного газа:

$$\nu_{B.G.} = 100 \cdot 22,4, м^3 \quad (5)$$

Масса рабочего топлива, необходимого для получения $\nu_{B.G.}$ газа:

$$G_T = \frac{\nu_{B.G.}}{\nu_{B.G.}} = \frac{100 \cdot 22,4}{\nu_{B.G.}}, кг \quad (6)$$

где $\nu_{B.G.}$ выход влажного газа из 1 кг топлива, $м^3/кг$.

Масса углерода в исходном топливе (по рабочей массе):

$$m_{C^P} = \frac{G_T C^P}{100}, кг \quad (7)$$

где C^P – процентное содержание углерода в топливе по рабочей массе.

Количество углерода ($кмоль$), содержащегося в топливе массой G_T , определяется по уравнению (8) в зависимости от массы углерода m_{C^P} и молекулярной массы углерода μ_C :

$$C_m^P = \frac{m_{C^P}}{\mu_C} = \frac{G_T C^P}{100 \cdot 12} = \frac{100 \cdot 22,4 \cdot C^P}{\nu_{B.G.} \cdot 100 \cdot 12} = \frac{1,867 C^P}{\nu_{B.G.}} \quad (8)$$

С учетом потерь углерода, возникших в результате недожога топлива, **уравнение баланса углерода** записывается в следующем виде:

$$\frac{1,867 C_o^P}{\nu_{B.G.}} = CO + CO_2 \quad (9)$$

где C_o^P – действительное процентное содержание углерода по рабочей массе, необходимое для образования 100 $кмоль$ влажного генераторного газа, δ – потери углерода, связанные с образованием золы и шлака, %.

$$C_o^P = C^P \left(\frac{100 - \delta}{100} \right) \quad (10)$$

Водород, как самостоятельный химический элемент, также находится в балансе химических реакций. Весь свободный водород H^P твердого топлива после химического взаимодействия преобразуется в свободный водород генераторного газа. Содержанием водорода в шлаке пренебрегается в виду незначительности.

Количество свободного водорода ($кмоль$) в массе рабочего топлива G_T определяется аналогично балансу углерода по уравнению (11):

$$H_m^P = \frac{m_{H^P}}{\mu_H} = \frac{G_T \cdot H^P}{100 \cdot 2} = \frac{100 \cdot 22,4 \cdot H^P}{\nu_{B.G.} \cdot 100 \cdot 2} = \frac{11,2 H^P}{\nu_{B.G.}} \quad (11)$$

Уравнение баланса водорода, с учетом вышеизложенного, записывается в следующем виде:

$$\frac{11,2 H^P}{\nu_{B.G.}} = H_2 \quad (12)$$

Количество кислорода в газогенераторе до химического взаимодействия вычисляется как

сумма кислорода рабочей массы топлива и кислорода подаваемого воздуха.

Количество кислорода топлива по рабочей массе (кмоль):

$$O_m^P = \frac{G_T \cdot O^P}{100 \cdot 32} = \frac{100 \cdot 22,4 \cdot O^P}{\nu_{B.G.} \cdot 100 \cdot 32} = \frac{0,7 O^P}{\nu_{B.G.}} \quad (13)$$

Количество воздуха (кмоль), необходимое для сжигания рабочей массы топлива G_T при коэффициенте избытка воздуха α :

$$\nu_B = \frac{M_B}{\mu_B} = \frac{G_T V_O \rho_B \alpha}{\mu_B} = \frac{100 \cdot 22,4}{\nu_{B.G.}} \cdot \frac{V_O \rho_B \alpha}{\mu_B} \quad (14)$$

где M_B - масса воздуха, необходимая для сжигания G_T кг топлива при коэффициенте избытка воздуха α , кг; V_O - теоретический объем воздуха, необходимый для полного сжигания 1 кг рабочего топлива при $\alpha = 1$, м³/кг; ρ_B - плотность влажного воздуха, кг/м³; μ_B - кажущаяся молекулярная масса влажного воздуха, кг/кмоль.

Плотность влажного воздуха и его кажущаяся молекулярная масса определены по следующим зависимостям:

$$\rho_B = \frac{B}{R_B T} - 0,0013 \frac{\varphi P_H}{T} \quad (15)$$

$$\mu_B = 28,96 - 10,944 \frac{\varphi P_H}{B} \quad (16)$$

где B - барометрическое давление, Па;

φ - относительная влажность, в долях единицы; P_H - давление насыщения водяного пара при температуре T , Па; R_B - удельная газовая постоянная сухого воздуха, Дж/кг · К.

Давление насыщения водяного пара P_H при температуре T определяется по таблицам насыщенного водяного пара или по приближенной зависимости:

$$P_H = 479 + (11,52 + 1,62(T - 273))^2, \text{ Па}$$

Количество подаваемого кислорода при сжигании массы топлива G_T с коэффициентом избытка воздуха α :

$$0,21 \cdot \nu_B = 0,21 \cdot \frac{100 \cdot 22,4}{\nu_{B.G.}} \cdot \frac{V_O \rho_B \alpha}{\mu_B} \quad (17)$$

где 0,21 - объемная доля кислорода в воздухе.

Уравнение баланса кислорода записывается в следующем виде:

$$\frac{0,7 O^P}{\nu_{B.G.}} + 0,21 \nu_B = CO_2 + 0,5(CO + H_2O) + 0,21 \nu_B^{изб} \quad (18)$$

Слагаемое $0,21 \nu_B^{изб}$ в правой части - это кислород в составе избыточного воздуха:

$$\nu_B^{изб} = \frac{100 \cdot 22,4}{\nu_{B.G.}} \cdot \frac{V_O \rho_B (\alpha - 1)}{\mu_B} \quad (19)$$

Для удобства компьютерных расчетов вводится функция β :

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{при } \alpha \leq 1 \\ (\alpha - 1) & \text{при } \alpha > 1 \end{cases} \quad (20)$$

Тогда уравнение (19) запишется в виде:

$$\nu_B^{изб} = \frac{100 \cdot 22,4}{\nu_{B.G.}} \cdot \frac{V_O \rho_B \beta}{\mu_B} \quad (21)$$

Так как диссоциация воды на водород и кислород возможна только при температурах выше 2000 °С, недостижимых для древесных газогенераторов, то вся влага топлива и влажного воздуха, полностью переходит в водяной пар генераторного газа.

Количество влаги (кмоль), содержащейся в топливе массой G_T :

$$H_2O_\omega^P = \frac{100 \cdot 22,4 \cdot W^P}{\nu_{B.G.} \cdot 100 \cdot 18} = \frac{1,244 W^P}{\nu_{B.G.}} \quad (22)$$

Количество влаги (кмоль), содержащейся в воздухе:

$$\nu_{H_2O}^B = \frac{M_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} \quad (23)$$

где M_{H_2O} - масса водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, кг; μ_{H_2O} - молекулярная масса воды, кг/кмоль.

Масса водяного пара в воздухе определяется из влагосодержания воздуха d

$$d = \frac{M_{H_2O}}{M_{C.B.}} \quad (24)$$

где $M_{C.B.}$ - масса сухого воздуха во влажном воздухе, кг.

По определению влажный воздух представляет собой механическую смесь сухого воздуха и водяных паров:

$$M_{B.L.B.} = M_{C.B.} + M_{H_2O} \quad (25)$$

отсюда масса сухого воздуха выразится:

$$M_{C.B.} = M_{B.L.B.} - M_{H_2O} \quad (26)$$

Подставляя выражение (26) в уравнение (24) получаем:

$$M_{H_2O} = \frac{d \cdot M_{B.L.B.}}{1 + d} \quad (27)$$

Масса влажного воздуха определяется следующим образом:

$$M_{B.L.B.} = G_T V_O \rho_B \alpha = \frac{100 \cdot 22,4}{v_{B.G.}} \cdot V_O \rho_B \alpha \quad (28)$$

С учетом выражения (28) зависимость (27) принимает вид:

$$M_{H_2O} = \frac{d}{1 + d} \cdot \frac{100 \cdot 22,4 \cdot V_O \rho_B \alpha}{v_{B.G.}} \quad (29)$$

Количество влаги ($\kappa\text{моль}$), содержащейся в воздухе:

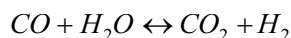
$$v_{H_2O}^B = \frac{d}{1 + d} \cdot \frac{100 \cdot 22,4 \cdot V_O \rho_B \alpha}{v_{B.G.} \cdot \mu_{H_2O}} \quad (30)$$

Уравнение баланса влаги запишется следующим образом:

$$\frac{1,244 W^P}{v_{B.G.}} + v_{H_2O}^B = H_2O \quad (31)$$

Тепловой баланс характеризуется двумя главными уравнениями.

Первое уравнение описывает характер протекания основной реакции газогенераторного процесса - обратимой реакции образования водяного газа:



с определенным равновесием между четырьмя компонентами CO , H_2O , CO_2 и H_2 , зависящим от температуры и определяющимся константой равновесия химической реакции.

$$K_v = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2} \quad (32)$$

Реакция образования водяного газа подвергалась многочисленным исследованиям с целью определения константы равновесия [4, 9, 10, 11, 12], результаты которых отображены в уравнении:

$$\lg K_v = -\frac{2207,2}{T} + 0,9115 \lg T - 9,738 \cdot 10^{-4} T + 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,098 \quad (33)$$

откуда

$$K_v = 10^{-\frac{2207,2}{T} + 0,9115 \lg T - 9,738 \cdot 10^{-4} T + 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,098} \quad (34)$$

Высокое значение константы равновесия при некоторых температурах свидетельствует о том, что в равновесной смеси концентрации продуктов прямой реакции высокие, а концентрации исходных веществ очень низкие, т.е. указывает на протекание прямой реакции при этой температуре практически до конца. Знак минус у логарифма константы равновесия

свидетельствует о преимущественном протекании реакции при данной температуре в обратном направлении. Рост значения константы равновесия с температурой указывает на усиление прямой реакции и соответствующее смещение равновесия в сторону этой реакции; убывание значения этой константы с ростом температуры, наоборот, указывает на смещение равновесия в направлении обратной реакции [11].

Вторым уравнением теплового баланса является уравнение теплоты процесса газификации. Из определения условного КПД газогенератора следует:

$$\eta_z = \frac{v_{B.G.} \cdot Q_H^{B.G.}}{Q_H^P} \quad (35)$$

где $v_{B.G.}$ - выход влажного газа из 1 кг топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$; $Q_H^{B.G.}$ - низшая теплота сгорания влажного газа, $\text{кДж}/\text{м}^3$, определяется по следующей зависимости:

$$Q_H^{B.G.} = 127,7CO + 107,6H_2 + 356,7CH_4 \quad (36)$$

Поскольку метан CH_4 в окислительно-восстановительной зоне не образуется в силу высоких температур, то CH_4 принимается равным 0 и с учетом уравнения (35) уравнение теплового баланса (36) запишется в виде

$$\frac{Q_H^P \eta_z}{v_{B.G.}} = 127,7CO + 107,6H_2 \quad (37)$$

Последним уравнением является уравнение для вычисления азота по балансу состава газа:

$$100 - (CO + CO_2 + H_2 + H_2O + O_2^{H3B}) = N_2^T \quad (38)$$

Количество азота до и после процессов горения и газификации остается практически неизменным, так как сам азот не участвует в химических реакциях, поэтому количество азота в воздухе N_2^B принимается примерно равным количеству азота в генераторном газе N_2^T

$$N_2^T \cong N_2^B = 0,79 v_B = 0,79 \cdot \frac{100 \cdot 22,4}{v_{B.G.}} \cdot \frac{V_O \rho_B \alpha}{\mu_B} \quad (39)$$

где 0,79 - объемная доля азота в воздухе.

Уравнение (38) с учетом зависимости (39) запишется в виде:

$$100 - (CO + CO_2 + H_2 + H_2O + O_2) = N_2^T = 0,79 v_B \quad (40)$$

Если учесть, что $O_2 = 0,21 v_B^{H3B}$, то выражение (40) преобразуется в следующее:

$$100 - (CO + CO_2 + H_2 + H_2O + 0,21 v_B^{H3B}) = 0,79 v_B \quad (41)$$

Решение системы уравнений. Состав компонентов генераторного газа и избыточный кислород, выход влажного газа из 1 кг рабочего топлива, определяется из совместного решения семи уравнений (9), (12), (18), (31), (32), (37), (40):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1,867 C_{\partial}^P}{v_{B.G.}} = CO + CO_2 \\ \frac{11,2 H^P}{v_{B.G.}} = H_2 \\ \frac{1,244 W^P}{v_{B.G.}} + v_{H_2O}^B = H_2O \\ \frac{0,7 O^P}{v_{B.G.}} + 0,21 v_B = CO_2 + 0,5(CO + H_2O) + 0,21 v_B^{ИЗБ} \\ 100 - (CO + CO_2 + H_2 + H_2O + 0,21 v_B^{ИЗБ}) = 0,79 v_B \\ \frac{Q_H^P \eta_e}{v_{B.G.}} = 127,7 CO + 107,6 H_2 \\ K_v = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2} \end{array} \right. \quad (42)$$

$$\text{где: } v_{H_2O}^B = \frac{d}{1+d} \cdot \frac{100 \cdot 22,4 \cdot V_O \rho_B \alpha}{v_{B.G.} \mu_{H_2O} \mu_B}$$

$$v_B = \frac{100 \cdot 22,4 \cdot V_O \rho_B \alpha}{v_{B.G.} \mu_B}$$

$$v_B^{ИЗБ} = \frac{100 \cdot 22,4 \cdot V_O \rho_B \beta}{v_{B.G.} \mu_B}$$

Введем временные обозначения алгебраических величин:

$$x = CO, y = CO_2, z = H_2, u = H_2O, n = N_2^F,$$

$$v_B^I = \frac{100 \cdot 22,4 \cdot V_O \rho_B}{\mu_B},$$

тогда

$$v_B = \frac{\alpha v_B^I}{v_{B.G.}}; \quad v_B^{ИЗБ} = \frac{\beta v_B^I}{v_{B.G.}}$$

$$v_{H_2O}^I = \frac{d}{1+d} \cdot \frac{100 \cdot 22,4 \cdot V_O \rho_B}{\mu_{H_2O}},$$

тогда

$$v_{H_2O}^B = \frac{\alpha v_{H_2O}^I}{v_{B.G.}}$$

С введенными обозначениями система уравнений преобразуется в следующий вид:

$$\frac{1,867 C_{\partial}^P}{v_{B.G.}} = x + y \quad (43)$$

$$\frac{11,2 H^P}{v_{B.G.}} = z \quad (44)$$

$$\frac{1,244 W^P}{v_{B.G.}} + \frac{\alpha v_{H_2O}^I}{v_{B.G.}} = u \quad (45)$$

$$\frac{0,7 O^P}{v_{B.G.}} + \frac{0,21 \alpha v_B^I}{v_{B.G.}} - \frac{0,21 \beta v_B^I}{v_{B.G.}} = y + \frac{x}{2} + \frac{u}{2} \quad (46)$$

$$100 - \frac{0,21 \beta v_B^I}{v_{B.G.}} - \frac{0,79 \alpha v_B^I}{v_{B.G.}} = x + y + z + u \quad (47)$$

$$\frac{0,00929 Q_H^P \eta_e}{v_{B.G.}} = 1,187 x + z \quad (48)$$

$$K_v = \frac{x \cdot u}{y \cdot z} \quad (49)$$

Результатом решения системы уравнений (43)-(49) способом подстановки являются выражения (50)-(55):

$$1,187(K_v - 1)x^2 v_{B.G.}^2 - [2,216 C_{\partial}^P K_v + 0,00929 Q_H^P \eta_e (K_v - 1) + 11,2 H^P + 1,244 W^P + \alpha v_{H_2O}^I] x v_{B.G.} + 0,0173 C_{\partial}^P K_v Q_H^P \eta_e = 0 \quad (50)$$

$$v_{B.G.} = \frac{1,867 C_{\partial}^P + 11,2 H^P + 1,244 W^P + (0,79 \alpha + 0,21 \beta) v_B^I + \alpha v_{H_2O}^I}{100} \quad (51)$$

$$y = \frac{1,867 C_{\partial}^P}{v_{B.G.}} - x \quad (52)$$

$$z = \frac{11,2 H^P}{v_{B.G.}} \quad (53)$$

$$u = \frac{1,244 W^P}{v_{B.G.}} + \frac{\alpha v_{H_2O}^I}{v_{B.G.}} \quad (54)$$

$$n = 100 - (x + y + z + u + 0,21 v_B^{ИЗБ}) \quad (55)$$

Избыточный кислород $0,21 v_B^{ИЗБ}$ (в случае наличия избытка воздуха, т.е. при $\alpha > 1$) определится через уравнение избыточного количества воздуха (20).

Найденные численные значения x, y, z, u и n являются концентрациями соответственно CO, CO_2, H_2, H_2O и N_2 влажного генераторного газа. Пересчет влажного состава газа на сухой осуществляется путем умножения значения каждого компонента газа на величину $\frac{100}{100 - H_2O}$. Результатом умножения будут искомые концентрации сухого газа.

Выход сухого газа находится аналогично, умножением на величину $\frac{100}{100 + H_2O}$, т.е.

$$v_{с.г.} = v_{в.г.} \cdot \frac{100}{100 + H_2O} \quad (65)$$

В качестве примера, в табл.2 и табл. 3 приведен сухой состав генераторного газа в конце окислительно-восстановительной зоны для двух видов древесного топлива.

Таблица 2 - Сухой состав генераторного газа по «Балансовой» части «Балансово-концентрационного» метода. Топливо: береза, влажность W=28%*

α	$CO, \%$	$CO_2, \%$	$H_2, \%$	$O_2, \%$	$N_2, \%$	$Q_H^p, \text{кДж}/\text{м}^3$
0,1	28,83	17,43	36,14	0,00	17,60	7570
0,2	24,48	14,85	30,73	0,00	29,94	6433
0,21	24,12	14,63	30,28	0,00	30,97	6338
0,22	23,77	14,42	29,84	0,00	31,98	6246
0,23	23,42	14,22	29,41	0,00	32,95	6156
0,24	23,09	14,02	28,99	0,00	33,90	6069
0,25	22,77	13,83	28,59	0,00	34,82	5984
0,26	22,45	13,64	28,20	0,00	35,71	5901
0,27	22,15	13,46	27,82	0,00	36,58	5821
0,28	21,85	13,28	27,44	0,00	37,43	5743
0,29	21,56	13,10	27,08	0,00	38,26	5667
0,3	21,27	12,94	26,73	0,00	39,06	5593
0,4	18,80	11,47	23,65	0,00	46,08	4946
0,5	16,84	10,30	21,21	0,00	51,65	4433
0,6	15,25	9,35	19,22	0,00	56,18	4015
0,7	13,93	8,57	17,58	0,00	59,93	3670
0,8	12,82	7,90	16,19	0,00	63,09	3379
0,9	11,87	7,34	15,01	0,00	65,79	3130
1,0	11,05	6,85	13,98	0,00	68,12	2915
1,1	10,16	6,32	12,87	1,67	68,98	2683
1,2	9,40	5,86	11,93	3,09	69,72	2484
1,3	8,75	5,47	11,11	4,32	70,35	2313
1,4	8,18	5,13	10,40	5,39	70,91	2163
1,5	7,68	4,83	9,77	6,33	71,40	2032
1,6	7,23	4,56	9,22	7,16	71,83	1915
1,7	6,84	4,32	8,72	7,90	72,21	1812
1,8	6,48	4,11	8,28	8,57	72,56	1718
1,9	6,16	3,92	7,87	9,18	72,87	1634
2,0	5,87	3,74	7,51	9,72	73,16	1558
3,0	3,97	2,60	5,13	13,29	75,01	1059

* – температура воздуха 283К, относительная влажность воздуха 70%, температура в окислительно-восстановительной зоне 1500К.

Таблица 3 - Сухой состав генераторного газа по «Балансовой» части «Балансово-концентрационного» метода. Топливо: ель, влажность W=25,5%*

α	$CO, \%$	$CO_2, \%$	$H_2, \%$	$O_2, \%$	$N_2, \%$	$Q_H^p, \text{кДж}/\text{м}^3$
0,1	28,90	16,58	36,80	0,00	17,72	7649
0,2	24,52	14,11	31,26	0,00	30,11	6494
0,21	24,15	13,91	30,79	0,00	31,15	6398
0,22	23,80	13,71	30,34	0,00	32,15	6304
0,23	23,45	13,51	29,91	0,00	33,13	6213
0,24	23,12	13,32	29,48	0,00	34,08	6124
0,25	22,79	13,14	29,07	0,00	35,00	6038
0,26	22,47	12,96	28,67	0,00	35,90	5954
0,27	22,16	12,79	28,28	0,00	36,77	5873
0,28	21,86	12,62	27,90	0,00	37,62	5794

Продолжение табл. 3

0,29	21,57	12,45	27,53	0,00	38,45	5717
0,3	21,29	12,29	27,17	0,00	39,26	5642
0,4	18,80	10,89	24,02	0,00	46,28	4986
0,5	16,83	9,78	21,53	0,00	51,86	4467
0,6	15,24	8,88	19,51	0,00	56,38	4045
0,7	13,91	8,13	17,83	0,00	60,13	3695
0,8	12,80	7,50	16,42	0,00	63,28	3401
0,9	11,85	6,96	15,22	0,00	65,97	3150
1,0	11,03	6,50	14,18	0,00	68,30	2934
1,1	10,14	5,99	13,05	1,67	69,15	2699
1,2	9,38	5,56	12,09	3,10	69,87	2499
1,3	8,73	5,19	11,26	4,32	70,50	2326
1,4	8,16	4,86	10,54	5,40	71,05	2175
1,5	7,66	4,58	9,90	6,34	71,53	2043
1,6	7,21	4,33	9,34	7,17	71,95	1926
1,7	6,82	4,10	8,83	7,92	72,33	1821
1,8	6,46	3,90	8,38	8,59	72,67	1727
1,9	6,14	3,71	7,97	9,19	72,98	1642
2,0	5,85	3,55	7,60	9,74	73,26	1565
3,0	3,96	2,47	5,20	13,30	75,08	1064

* – температура воздуха 283К, относительная влажность воздуха 70%, температура в окислительно-восстановительной зоне 1500К.

Заклучение

В данной работе предложен новый метод расчета состава древесного генераторного газа, представляющий совокупность модифицированного общепринятого балансового метода [2], и добавленного метода расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций в активных зонах газификации с различными температурами. В предлагаемом методе различают не одну, а три активные зоны газификации:

1) *окислительно-восстановительная зона*, где отдельно протекают окислительные процессы (образование окиси и двуокиси углерода путем окисления углерода топлива и повторно двуокиси углерода посредством окисления угарного газа) и отдельно-восстановительные процессы (образование водорода, окиси и двуокиси углерода путем восстановления углерода водяным паром и двуокисью углерода). Температура в окислительно-восстановительной зоне ниже адиабатной температуры горения древесного топлива.

2) *восстановительная зона*, где проходят только восстановительные реакции в виду полного отсутствия окислителя – кислорода. Температура в восстановительной зоне выше 980 °С.

3) *зона взаимодействия продуктов газификации* между собой и с углеродом вновь поступающего нагретого топлива. Температура в зоне взаимодействия продуктов газификации друг с другом и с углеродом топлива ниже 980 °С. Именно в этой зоне протекают реакции образования метана

В данной статье рассматривается только первая («Балансовая») часть предлагаемого метода, заключающаяся в моделировании процессов в окислительно-восстановительной зоне, поставляющей продукты первичной газификации в другие активные зоны.

В «Балансовой» части предлагаемого метода устранены основные недостатки общепринятого метода [2]:

- в явном виде учтен коэффициент избытка воздуха в окислительно-восстановительной зоне;

- учтена влага воздуха, используемого в качестве газифицирующего агента;

- исключено положение о диссоциации воды на водород и кислород в окислительно-восстановительной зоне древесных газогенераторов с соответствующим изменением балансовых уравнений;

- значение константы равновесия химической реакции водяного газа берется для конкретного и достаточно узкого диапазона

изменения температур в окислительно-восстановительной зоне газификации.

По уравнениям «Балансовой» части предлагаемого метода расчетным путем определены расход древесного топлива и влажного воздуха, теплота сгорания, также выход, состав и концентрация компонентов древесного генераторного газа в конце окислительно-восстановительной зоны.

Состав и концентрация компонентов древесного генераторного газа в конце окислительно-восстановительной зоны служат исходными данными для последующих расчетов процессов в остальных активных зонах газификации, которые рассматриваются в другой («Концентрационной») части «Балансово-концентрационного» метода.

Следует отметить, что даже результаты расчета состава и концентраций компонентов древесного генераторного газа в конце окислительно-восстановительной зоны, приведенные в табл.2 и табл.3, дают лучшее согласование с известными опытными данными, чем по методу[2]. Ожидается, что учет процессов химического взаимодействия в других активных зонах в рамках «Концентрационной» части еще более улучшит согласование с опытами.

Литература

1. Газогенератор твердого топлива: пат. 2579112 РФ.

№2014144242/03; заявл. 31.10.2014; опубл. 27.03.2016, Бюл. № 9

2. Юдушкин Н.Г. Газогенераторные тракторы. Теория, конструкция и расчет. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1955. – 244 с.

3. Гинзбург Д.Б. Газификация низкосортного топлива. М.: Государственное издательство литературы по строительным материалам, 1950. – 173 с.

4. Федосеев С.Д., Чернышев А.Б. Полукоксование и газификация твердого топлива. М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной горно-топливной литературы, 1960. – 327 с.

5. Коллеров Л.К. Газомоторные установки. М., СПб.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1951. – 240 с.

6. Лямин В.А. Газификация древесины. М.: Лесная Промышленность, 1967. – 263 с.

7. Головкин С.И., Коперин И.Ф., Найденов В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесная промышленность, 1987. – 221 с.

8. Токарев Г.Г. Газогенераторные автомобили. М.: МАШГИЗ, 1955. – 204 с.

9. Дешалит Г.И. Расчеты процессов газификации топлив. Харьков: Издательство Харьковского Ордена Трудового Красного Знамени государственного университета им. А.М. Горького, 1959. – 167 с.

10. Богданов Н.Н. Полукоксование и газификация торфа. М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1947. – 271 с.

11. Лавров Н.В., Шурин А.П. Введение в теорию горения и газификации топлива. М.: Издательство академии наук СССР, 1962. – 217 с.

12. Лавров Н.В. Физико-химические основы горения и газификации топлива. М.: Государственное научно-техническое издательство по черной и цветной металлургии, 1957. – 289 с.

УДК 676.031

АКТУАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ОТРАСЛИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИСТВЕННОЙ

А.В. Сафина, Р.Г. Сафин, А.Р. Хайрутдинова, Д.М. Сайфутдинов, К.В. Валеев, Л.Ш. Асаева

В данной статье проведен обзор отечественных исследований в области комплексной переработки биомассы лиственной.

Ключевые слова: дигидрокверцетин, переработка, лиственная, этиловый спирт, растворитель

In this article, a survey of domestic research in the field of complex processing of larch biomass was conducted.

Keywords: dihydroquercetin, processing, larch, ethyl alcohol, solvent.

Введение

Древесина лиственных сибирской и даурской, произрастающих на территории Сибири и Дальнего Востока, является богатым источником флавоноидов - флаваноло дигидрокверцетина, таксифолина и, сопутствующих ему дигидрокемпферола и нарингенина.[1]

В настоящее время, одним из перспективных компонентов, привлекающих внимание ученых и медицинских практиков, является биофлавоноид дигидрокверцетин (ДКВ). ДКВ был признан важнейшим Р-витамином по результатам исследований 50-60-х годов, в которых изучалось воздействие антиоксидантов на системы жизнеобеспечения живых организмов. Данный Р-витамин обладает высокой активностью антиоксидантного и капилляропротекторного характера. Причем эта активность значительно превосходила ранее изученные природные антиоксиданты. ДКВ оказывает целую гамму положительных воздействий на обменные реакции в организме и динамику различных патологических процессов, что подтверждено многочисленными работами отечественных и зарубежных ученых. По существующим данным потребность в ДКВ на российском рынке увеличилась до 18 тонн в год. Существующие производства покрывают эту потребность лишь на 65%.

Субстанция ДКВ имеет относительно повышенную цену. Это обуславливается тем, что российское производство сталкивается с рядом проблем в процессе изготовления готовой продукции. На сегодняшний день, цена за 1 грамм дигидрокверцетина равняется 434 рублям.[2] В связи с большим количеством сопутствующих веществ, процесс выделения дигидрокверцетина является весьма сложным. Патентованные методы выделения

дигидрокверцетина нередко возможны лишь в лабораторных условиях, так как в производственных масштабах появляются проблемы с регенерацией растворителей, переработкой отходов. Данные способы сложны в исполнении - применяются дорогие растворители, которые не всегда обеспечивают чистоту продукции. Существующие методы получения субстанции довольно энергозатратны, что связано с трудностью регенерации экстрагентов, а также их огнеопасностью и токсичностью. Следовательно, способы производства субстанции в промышленных масштабах должны отвечать требованиям безопасности. Флавоноидные соединения, в частности дигидрокверцетин, обладают широкой гаммой биологических свойств - антигистаминным, антиоксидантным, антитромбоцитарным, гастро- и гепатопротекторным, капилляропротекторным, противоатеросклеротическим, противовоспалительным и радиозащитным действием. Они находят все большее применение в фармацевтике, косметике и пищевой промышленности.

Учитывая большой диапазон полезной биологической активности субстанции, проблема оптимизации производственных условий получения дигидрокверцетина является весьма актуальной. Большинство известных способов выделения дигидрокверцетина из древесины лиственной основаны на экстракции его различными растворителями. В зависимости от используемого растворителя все известные способы можно разделить на три группы:

1) с использованием спирто-бензольной смеси. С помощью спирто-бензольной смеси из древесины лиственной можно извлечь 15 % водорастворимых веществ, которые включают в себя 95% арабиногалактана, а также остальные

фенольные соединения, такие как дигидрокверцетин и дигидрокемпферол (ДКМ).

2) с использованием органических растворителей. Его принято считать основным методом.

При данном способе используются экстрагенты, которые можно разделить на две основные группы: а) неполярные растворители: используются в основном н-гексан или экстракционные бензины. Такие вещества, как смоляные и жирные кислоты, терпены экстрагируются гексаном; б) полярные растворители: спирты, простые сложные эфиры, кетоны и хлорорганические соединения. Чаще всего на практике используется метанол. Такие растворители, как диэтиловый эфир, этилацетат, ацетон и хлороформ позволяют экстрагировать из древесины лиственницы практически все имеющиеся экстрактивные вещества, кроме полисахаров.

3) с использованием смеси растворителей с водой, такие как метанол: вода, ацетон - вода.

Анализ исследований

В работе Кислицына А.Н. и Мальчикова Е.Л. [3] был описан способ выделения дигидрокверцетина из древесины лиственницы и установка для его осуществления. При данном способе был выделен дигидрокверцетин из измельченной древесины лиственницы экстракцией монокомпонентным органическим растворителем. Древесину измельчали до размера щепы. Процесс экстракции проводили последовательно в двух экстракторах, обеспечивая на каждой отдельно взятой ступени непрерывную циркуляцию одного, необходимого для погружения щепы в жидкую среду, объема экстракта в экстракторе. Одновременно с этим в экстракторе создается низкочастотное пульсирующее поле при температуре, близкой к точке кипения растворителя. Предложенный способ и установка для выделения дигидрокверцетина позволяют уменьшить расход экстрагента.

Левданский В.А. и другие авторы [4] разработали способ получения дигидрокверцетина, который заключается в том, что измельченную древесину лиственницы подвергают экстракции водным раствором этилового спирта при кипячении в течение 1-2 часов при гидромодуле 10-15. Техническим результатом изобретения является упрощение способа за счет сокращения стадий процесса, повышение экологической безопасности

способа. Кроме того, техническим результатом изобретения является выделение на промежуточной стадии ценного продукта-арабиногалактана.

В работе Остронкова В. С. и Лашина С. А. [5] рассматривался способ получения дигидрокверцетина, включающий экстракцию высушенной и измельченной древесины лиственницы водным раствором этилового спирта при нагреве. Предложенный способ позволяет получать целевой продукт с выходом 1,5-2,5% от массы абсолютно сухой древесины со степенью чистоты 95,5-99,5% и при этом способствует упрощению процесса получения дигидрокверцетина, повышению его экологичности и сокращению длительности.

Кершенгольц Б.М. и др. [6] разработали способ получения биопрепаратов на основе дигидрокверцетина. Авторы работы измельчали отходы лесозаготовки и лесопереработки лиственницы и подвергали твердофазной механо-химической обработке в шаровой мельнице в присутствии сухого гидроксида натрия при соотношении 19:1. Полученную смесь заливали водой, выдерживали при перемешивании в течение 15 часов, отделяли жидкую фазу от нерастворенных частиц фильтрацией и осаждали дигидрокверцетин из водного экстракта подкислением соляной кислотой. Данный способ получения дигидрокверцетина является экологически чистым, энерго- и ресурсосберегающим и, соответственно, экономически рентабельным. Препарат не содержит токсичных примесей. Чистота ДКВ составляет 70-75%. При таких характеристиках препарат из ДКВ может быть использован не только в лечебно-профилактических, но и в пищевых, косметологических и технических целях.

Кочетов А.С. и Кочетов С.А. в своей работе [7] усовершенствовали способ переработки древесины лиственницы и выделения из нее биофлавоноидов, таких как дигидрокверцетин. В данном способе измельченную фракционированную древесину предварительно замачивали в два этапа, поочередно в водно-углеводородном и в водно-спиртовом растворах. После проводилась экстракция из древесины природных веществ в условиях нахождения компонентов экстракционной массы в псевдооживленном состоянии с подогревом при температуре 30-40°C. Предложенный способ и устройство для его

осуществления позволяют сократить общую продолжительность технологического процесса, снизить расход органических растворителей, уменьшить металлоемкость оборудования и упростить технологию выделения биофлавоноидов. Также способ может найти широкое применение при организации промышленного производства и при этом обеспечить получение целевого продукта с высоким содержанием основного вещества.

В работе [8] предложен новый способ комплексной обработки древесины лиственницы.

Установка работает следующим образом. Через бункер питатель 1 в шнековый транспортер 9 подают древесное сырье. Параллельно в шнековый транспортер 9 через узел подачи растворителя 2 и подогреватель для растворителя 3 подают спирт. Древесное сырье совместно со спиртом поступает в измельчитель-дисмембратор 10, где измельчается. Затем оно поступает в экстрактор измельченного сырья 14, где происходит процесс экстракции.

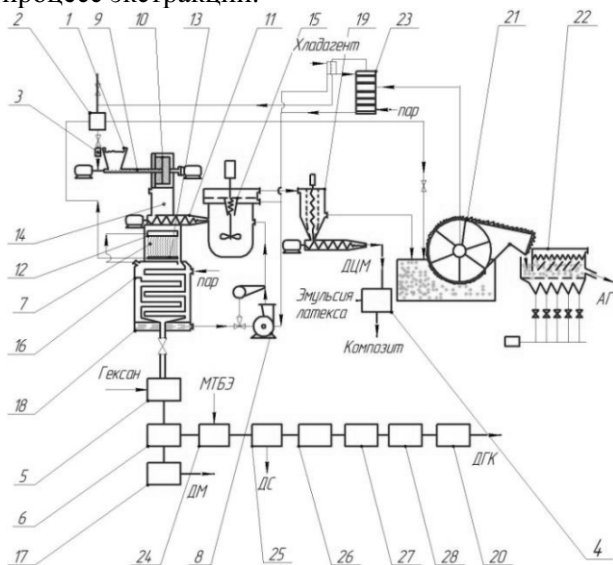


Рис.1 Установка для комплексной переработки древесины лиственницы.

Проекстранированное сырье поступает в отжимной шнек-пресс 11, где сырье разделяют на жидкую и твердую пульпы. Жидкая пульпа стекает вниз и, соприкасаясь со стенками конденсатора паров жидкой пульпы 7, предварительно прогревается. Затем она попадает в испаритель для жидкой пульпы - выпарной аппарат 16, где, за счет подачи глухого пара воды, происходит ее нагрев и выпаривание. Образовавшиеся в испарителе для жидкой пульпы 16 пары экстракта

дигидрокверцетина отправляют в коллектор ввода паров экстракта дигидрокверцетина 12 для предварительного прогрева жидкой пульпы, сконденсировавшийся из паров экстракта дигидрокверцетина спирт собирают в коллекторе сбора конденсата растворителя 13 и отправляют в узел подачи растворителя 2. Сконденсированные в испарителе для жидкой пульпы пары воды собирают в сборнике конденсата паров воды 18 и с помощью центробежного насоса 8 отправляют в экстрактор для твердой пульпы, выполненный в виде смесителя-сепаратора 15. Полученный концентрат дигидрокверцетина из испарителя для жидкой пульпы 16 направляют в экстрактор для обработки концентрата дигидрокверцетина 5, туда же подают гексан. Полученная смесь поступает в фильтр разделения концентрата дигидрокверцетина 6, где происходит разделение на твердую компоненту, и жидкую компоненту, содержащую древесное масло. Из жидкой компоненты удаляют гексан в испарителе для жидкой пульпы 17 и получают древесное масло. А твердая компонента поступает в экстрактор для твердой компоненты 24 для обработки метилтретбутиловым эфиром. Из полученного раствора на фильтре для твердой компоненты 25 удаляют древесные смолы, в результате чего получают раствор технического дигидрокверцетина. Затем его упаривают в испарителе для технического дигидрокверцетина 26, кристаллизуют в кристаллизаторе 27. Полученный раствор кристаллического дигидрокверцетина сепарируют фильтром для кристаллического дигидрокверцетина 28, а затем перемещают в сушилку для кристаллического дигидрокверцетина 29, выполненную в виде вакуумной сушилки. Твердая пульпа после разделения в фильтре 11, попадает в экстрактор для твердой пульпы 15, выполненный в виде смесителя-сепаратора, где происходит ее обработка водой при температуре 90-95 °С, поступающей из сборника конденсата паров воды 18 и патрубка вывода кубового остатка ректификационной колонны 23. Затем проекстранированная масса поступает на фильтр для разделения на древесноцеллюлозную массу и раствор арабиногалактана 19. Полученную древесноцеллюлозную массу смешивают в смесителе 30 с раствором стирольного или акрилового латекса и получают композиционный материал (композит). А

раствор арабиногалактана отправляют в барабанный вакуум-фильтр 21, где происходит осаждение арабиногалактана за счет обработки спиртом из узла подачи растворителя 2. Затем отфильтрованный арабиногалактан сушат в сушилке кипящего слоя 22. Спиртовой раствор из барабанного вакуум-фильтра 21 отправляют в ректификационную колонну 23, где происходит его разделение на дистиллят – спирт, и кубовый остаток – воду. Дистиллят отправляют на повторное использование в узел подачи растворителя 2, а кубовый остаток отправляют через патрубок вывода в экстрактор для твердой пульпы. Потери воды в экстракторе твердой пульпы возмещают за счет подачи отработанного хладагента, поступающего из ректификационной колонны.

Представленная установка комплексной переработки древесины лиственницы позволяет извлечь из лиственницы дигидрокверцетин, снизить энергозатраты на проведение процесса за счет рекуперации тепловой энергии паров экстракта дигидрокверцетина для предварительного прогрева жидкой пульпы, и тепловой энергии конденсата паров воды для прогрева экстрактора твердой пульпы.

В статье В.А. Бабкина и др. [9] была предложена технология комплексной переработки биомассы лиственницы. Разработаны эффективные способы выделения экстрактивных веществ древесины и коры. Технология включает гидролиз остатка и позволяет получать кристаллическую глюкозу или спирт. Дальнейшая переработка негидролизующихся остатков древесины и коры дает ряд ценных продуктов. Отличительной чертой данной технологии является высокая рентабельность, экологичность и экономическая целесообразность.

В статье С.А. Кузнецовой и др. [10] был предложен новый способ комплексной переработки древесины лиственницы с получением арабиногалактана (АГ), дигидрокверцетина, микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) и низкомолекулярного лигнина (НЛ).

Процесс основан на комбинации стадий экстрагирования АГ и ДКВ кипящей водой, каталитической делигнификации экстрагированной древесины смесью уксусной кислоты и сольволиза целлюлозного продукта с получением МКЦ и НЛ. Было изучено влияние условий осуществления отдельных стадий интегрированного процесса: температура,

состав реакционной среды, соотношение вода/древесина, продолжительность обработки и др. на выход целевых продуктов. При оптимальных условиях процесса переработки древесины лиственницы были получены следующие максимальные выходы продуктов (% масс, на а.с.д.): АГ 18, ДКВ 0.6, МКЦ 21, НЛ 12. Надмолекулярная структура и степень полимеризации МКЦ из опилок древесины лиственницы находятся в хорошем соответствии с аналогичными показателями стандартной МКЦ из хлопковой целлюлозы.

В.А. Бабкин и др. [11] в работе разработали основы выделения биологически активных экстрактивных веществ из древесины лиственницы. Создали экономичную и простую в реализации технологию получения дигидрокверцетина, арабиногалактана и смолистых веществ. Комплексная технология извлечения экстрактивных веществ из биомассы лиственницы разработана на основе опытной установки по выделению дигидрокверцетина. Экспериментальные данные свидетельствуют о технической возможности совместного получения перечисленных веществ на одной комплексной установке с небольшими техническими изменениями и дополнениями. Универсальность отработанных технологий позволит достичь высоких технико-экономических показателей производства.

Также В.А. Бабакиным и др. [12] был предложен способ комплексной переработки древесины лиственницы. Создание технологии безотходной переработки биомассы лиственницы предполагало получение новых биологически активных природных продуктов, необходимых для удовлетворения нужд медицины, фармакологии, сельского хозяйства, парфюмерно-косметической промышленности. Одновременно решались экологические проблемы утилизации отходов деревоперерабатывающих производств. В рамках выполнения работы по комплексной переработке биомассы лиственницы были разработаны отдельные технологии получения экстрактивных веществ из древесины и коры. Создана математическая модель процессов выделения ДКВ и других экстрактивных веществ из древесины лиственницы. На основе этого рассчитан материальный баланс по общим массовым расходам и по каждому компоненту в отдельности. Полученная математическая модель использовалась для оптимизации технологических процессов и создания

технологической схемы. В результате проведенных экспериментальных исследований была отработана последовательность и технологические режимы выделения экстрактивных веществ. Рассчитан материальный и тепловой баланс, определены основные характеристики протекания процессов экстракции и дистилляции. Создана оптимальная технологическая схема, имеющая замкнутый оборот растворителя. Универсальность отработанных технологий комплексной переработки биомассы лиственницы позволит достичь высоких технико-экономических показателей производства в промышленных условиях.

В работе В.А. Бабкина [12] предложена схема экстракционной переработки коры лиственницы -многоотнажного отхода деревоперерабатывающей промышленности. Изучен химический состав и свойства получаемых продуктов : воск, антиоксидантный фитокомплекс, водорастворимые вещества, пектиновые вещества и сорбент.

В работе С.А. Кузнецовой [13] предложили способ интенсификации процессов выделения арабиногалактана из древесины лиственницы с использованием методов ультразвукового и ударно-акустического воздействия (УАВ). В ходе выполненной работы был разработан метод ударно-акустической обработки, позволяющий снизить температуру экстракции АГ из древесины лиственницы с 95 до 25 °С и ее продолжительность от 120 до 0,5-1,0 мин. Обеспечивая при этом высокий выход арабиногалактана (в 2,5 раза выше, чем в отсутствии УАВ). Увеличение его выхода обусловлено интенсификацией процессов массопереноса в результате ударно-акустического воздействия. Это позволило с высокой эффективностью извлекать АГ из древесины лиственницы при комнатной температуре и малой продолжительности процесса (от 30 с). В результате снижения температуры и продолжительности экстракции уменьшается термическая и гидролитическая деструкция извлекаемого арабиногалактана. Однако предложенный способ осуществим лишь в лабораторных условиях.

М.С. Василишиным [14] был предложен метод экстракции арабиногалактана из древесины лиственницы в аппарате роторно-пульсационного типа (РПА). При выполнении данной работы проводились сравнительные исследования экстракции в РПА и без РПА. Из

анализа полученных зависимостей следовало, что в сравнительном эксперименте (без РПА) через 30 мин процесса степень извлечения АГ составляет всего 81 %. В случае обработки в РПА было установлено, что с увеличением числа оборотов ротора РПА растет степень извлечения целевого компонента, а также скорость извлечения. Также арабиногалактан, полученный на установке с РПА, характеризовался высоким качеством.

В статье Н.В. Транчук [15] были представлены результаты исследования содержания экстрактивных веществ в древесной зелени лиственницы летнего и осеннего сборов, а также опавшей хвои. Определено, что основной группой веществ изопропанольного экстракта разных частей кроны лиственницы являются липофильные соединения. Экстракт петролейного эфира летней древесной зелени, коры побегов и осенних побегов на 50-60% состоит из свободных кислот. Нейтральные вещества являются основной группой липофильных соединений хвои обоих сборов. Также было установлено, что летом в хвое лиственницы содержится больше фенольных соединений, чем в осенний период. А в побегах, напротив, к осени содержание фенольных соединений увеличивается. Доминирующими среди них являются менее полярные вещества. Ряд показателей групповых составов экстрактов кроны лиственницы сибирской, особенно осеннего сбора, превышает подобные показатели в древесной зелени других хвойных пород, что предполагает возможность ее использования для химической переработки с получением биологически активных продуктов.

В работе Н.Н. Трофимовой [16] была предложена лабораторная схема получения кристаллической глюкозы при кислотном гидролизе трудногидролизуемых полисахаридов(целлюлозы). Для гидролиза использовали беленую целлюлозу. Гидролиз целлюлозы проводили 72 % серной кислотой с гидромодулем 1:3 при комнатной температуре в течение 1 часа. Продукты гидролиза - инвертируемые полисахариды (ИПС) - высаживали 5-ти кратным объемом этанола. Кислый спирт декантировали с осадка. Осадок фильтровали и промывали спиртом до нейтральной реакции последней промывной порции. Продукт сушили на воздухе до влажности 6 % от веса абсолютно сухого вещества(а.с.в.). Данный способ может быть перспективен для предгидролизной обработки

лигноцеллюлозного комплекса для быстрого и эффективного удаления нецеллюлозных полисахаридов. Также в работе была проведена оптимизация параметров процесса инверсии промежуточного продукта, и получены гидролизаты, содержание глюкозы в которых достигает 15 %.

Трошина А.В. [17] в своей работе исследовала состав основных структурных компонентов разных частей кроны дерева, содержания экстрактивных веществ, извлекаемых различными органическими растворителями и водой. Сырье предварительно измельчали. Проводили эксперимент на экстракторе Сокслета с использованием горячей воды. Был определен состав экстрактивных веществ. Массовую долю целлюлозы определяли методом Кюршнера, лигнин - с 72 %-й серной кислотой в модификации Комарова, содержание арабиногалактана - обработкой водного экстракта спиртом. Выполнялся расчет массовой доли экстрактивных веществ, целлюлозы, лигнина и арабиногалактана к абс. сухому веществу с учетом влажности исследуемых образцов. При проведении данного исследования было установлено, что состав свободных кислот отдельных частей древесной зелени имеет существенные различия, а также в хвое преобладают высшие жирные кислоты, линоленовая и пальмитиновая.

Кузнецов Б.Н. [18] в своей работе установил закономерности формирования углеродных материалов, которые получают совмещенным процессом пиролиза - активации из коры лиственницы, предварительно экстрагированной различными растворителями. Кору лиственницы высушивали в сушильном шкафу при температуре 100-105°C в течение 5-6 ч, измельчали, просеивали, отбирали фракцию и досушивали ее до постоянного веса в вакуумном эксикаторе. После чего последовательно экстрагировали растворителями с возрастающей полярностью в аппарате Сокслета объемом 1000 мл. Для извлечения смолистых веществ навеску коры весом 200 г с влажностью до 1% экстрагировали гексаном в течение 8 ч. После экстракции гексаном кору высушивали при температуре 100-105°C и экстрагировали изопропиловым спиртом в течение 7 ч. После экстракции гексаном и изопропиловым спиртом кору высушивали и экстрагировали водой в течение 8 ч.

В статье Н.В. Ивановой [19] был рассмотрен процесс выделения полисахаридов из древесины лиственницы. Экстракцию проводили с использованием этилацетата и воды, посредством обработки смесью 0,5% водных растворов оксалата аммония и щавелевой кислоты (1 : 1). Выделенные полисахариды были очищены и разделены ионообменной хроматографией на диэтиламиноэтилцеллюлозе. В процессе хроматографии на диэтиламиноэтилцеллюлозе был сделан вывод о том, что в состав *поливинилового спирта* входят четыре соединения, два из которых являются представителями кислых арабиногалактанов, а два - класса пектинов.

Н.В. Гончарова [20] в своей работе проводила исследования влияния продолжительности процесса водно-щелочной экстракции на качественный состав получаемых экстрактов. Изучались водно-щелочные экстракты, полученные из коры лиственницы сибирской при различной продолжительности процесса. Эксперимент проводили следующим образом: кору лиственницы сибирской, измельченную на дезинтеграторе до состояния древесной пыли, помещали в колбу. Затем в колбу заливают расчетное количество 1%-го раствора едкого натрия (температура раствора составляла 70°C). После чего колбу термостатировали на время проведения процесса экстракции. Процесс экстракции проводили методом настаивания. Исследованиями было показано, что наиболее эффективным как по выходу экстракта, так и по его качественному составу следует принять продолжительность экстракции 30 мин, так как при этом происходит наиболее полное извлечение танинов из сырья.

Заключение

Результаты представленных исследований свидетельствуют о необходимости предварительной обработки древесины лиственницы для дальнейшей экстракции, а также внедрении инновационных технологий. Традиционные методы экстракции характеризуются длительным и трудоемким технологическим процессом, что осложняется труднодоступностью для большинства растворителей таких компонентов как дигидрокверцетин и протеканием различных нежелательных химических реакций в процессе получения нужных компонентов. Несмотря на

востребованность в дорогостоящем оборудовании, такие методы как предварительная активация древесины с последующим щелочным гидролизом, обработка ультразвуком, а также всевозможные виды экстракции с применением СВЧ – поля на данный момент значительно превосходят по эффективности традиционные методы экстракции.

Литература

1. Ковалевская, Е.Г. Оптимизация условий производства субстанции дигидрокверцетина, разработка лекарственного препарата на ее основе: автореф.дис...канд.фарм.наук/Е.Г. Ковалевская.-Пятигорск:ВГМУ,2014. - С. 5-7.
2. Цены продукции ООО «Ростовская фармацевтическая фабрика». [Электронный ресурс] <https://flavitax.jimdo.com/> -96-7-98-6/
- 3.Способ выделения дигидрокверцетина из древесины лиственницы и установка для его осуществления: пат. 2346941 Рос.Федерация: МПК C07D 311/40, C07D 311/32, B01D 11/02 Кислицын А.Н., Мальчиков Е.Л.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Элиор".- № 2007114401/04; заявл. 16.04.2007; опубл. 20.02.2009, Бюл.№ 5.- 3 с.
4. Способ получения дигидрокверцетина: пат. 2454410 Рос.Федерация: МПК C07D311/32 Левданский В.А., Левданский А.В., Кузнецов Б.Н., заявитель и патентообладатель: Учреждение Российской академии наук Институт химии и химической технологии Сибирского отделения РАН (ИХХТ СО РАН).- № 2011120963/04; заявл. 24.05.2011; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18.- 3 с: ил.
5. Способ получения дигидрокверцетина: пат. 2435766 Рос.Федерация: МПК C07D 311/40, C07D 311/32 Остронков В.С., Лашин С.А.; заявитель и патентообладатель Остронков В.С., Лашин С.А.- № 2010146055/04; заявл. 11.11.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл.№ 34.- 1 с.
6. Способ получения дигидрокверцетина из отходов лесозаготовки и лесопереработки лиственницы: пат. 2386624 Рос.Федерация: МПК C07D 311/32, C07D 311/40, A61K 36/00 Кершенгольц Б.М., Шашурин М.М., Хлебный Е.С., Шеин А.А., Журавская А.Н., Ломовский О.И., Жуков М.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Биотех".- № 2007142814/13; заявл. 19.11.2007; опубл. 20.04.2010, Бюл.№ 11.- 3 с.
7. Способ переработки древесины лиственницы с выделением дигидрокверцетина и устройство для его осуществления: пат. 2206568 Рос.Федерация: МПК C07D 311/40, C07D 311/32, B01J 8/00 Кочетов А.С., Кочетов С.А.; заявитель и патентообладатель ЗАО "Дормашинвест", Кочетов Анатолий Сергеевич.- № 2002107892/04; заявл. 28.03.2002; опубл. 20.06.2003, Бюл.№ 17.- 2 с.
8. Положительное решение о выдаче патента, «Способ комплексной переработки древесины лиственницы»; Сафина А. В. и др. Заяв.(2017123820/13(041350)
- 9.В.А.Бабкин, Л.А.Остроухова Безотходная комплексная переработка биомассы лиственниц сибирской и даурской / Бабкин В.А. // http://mbf.obninsk.ru/files/File/articles/20090920_Babkin_Ostrouhova.pdf
10. Кузнецова С.А., Данилов В.Г. Новый интегрированный процесс комплексной переработки древесины лиственницы в ценные химические продукты. / С.А.Кузнецова // Хвойные бореальной зоны.- 2003.-В.1.- С.96-100.
11. Бабкин В.А., Остроухова Л.А. Биологические активные экстрактивные вещества из древесины лиственницы / В.А.Бабкин // Химия в интересах устойчивого развития.-2001.-№ 9.-С.363-367.
12. Бабкин, В.А., Остроухова, Л.А. Продукты глубокой химической переработки биомассы лиственницы. Технология получения и перспективы использования. / В.А.Бабкин // Рос. хим. ж.-2004.- т.48.- С.62-69.
13. Кузнецова С.А., Михайлов А.Г. Интенсификация процесса водной экстракции арабиногалактана из древесины лиственницы. / С.А.Кузнецова // Химия растительного сырья.- 2005.-№1.- С.53-58.
14. Василишин, М.С., Будаева, В.В. Экстракция арабиногалактана из опилок лиственницы сибирской в аппарате роторно-пульсационного типа. / М.С.Василишин // Ползуновский вестник.- №.4.-2010.- С.168-173.
15. Транчук, Н.В., Рошин, В.И. Групповой состав экстрактов из кроны лиственницы сибирской летнего и осеннего сборов. / Н.В.Транчук // Химия растительного сырья.- 2015.- №4.- С. 63-70.
16. Трофимова Н.Н., Бабкин В.А. Изучение кислотного гидролиза полисахаридов

древесины лиственницы для получения кристаллической глюкозы / Н.Н.Трофимова // Химия растительного сырья.-2009.-№.3.-С.31-37.

17. Трошин А.В., Рошин В.И. Групповой состав и свободные кислоты экстрактивных веществ частей кроны лиственницы сибирской/ А.В.Трошин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал.-2014.-№.2.-С.27-31.

18. Б.Н. Кузнецов, Ю.Г. Головин, В.В. Головина, А.О. Еремина, В.А. Левданский Получение углеродных адсорбентов из продуктов экстракционной переработки коры лиственницы/ Б.Н.Кузнецов // Химия растительного сырья.-2002.-№.2.-С.57-61.

19. Н.В. Иванова, Р.Г. Оводова, В.А. Бабкин. Общая характеристика полисахаридов коры лиственницы / Н.В.Иванова // Химия растительного сырья.-2006.-№.1.-С.15-20.

20. Н.В. Гончарова, М.В. Ток, Т.В. Рязанова. Влияние продолжительности экстракции на состав водно-щелочных экстрактов лиственницы сибирской/ Н.В.Гончарова // Химия растительного сырья.-1998.-№.2.-С.75-78.

21. Способ получения дигидрокверцетина: пат. 2246301 Рос.Федерация: МПК А61К 31/35, А61К 35/78 Бабкин В.А., Остроухова Л.А., Бабкин Д.В.; заявитель и патентообладатель Бабкин В.А., Остроухова Л.А., Бабкин Д.В..- № 2003121287/15; заявл. 14.07.2003; опубл. 20.02.2005, Бюл.№ 5.- 3 с.

22. Способ комплексной переработки древесины лиственницы: пат. 2279284 Рос.Федерация: МПК А61К 36/15 Бережной А.Г., Саввин А.В., Гаврилов А.Б.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научный Центр Прикладных Исследований "БИОТЕХПРОМ" (ООО "Научный Центр Прикладных Исследований "БИОТЕХПРОМ").- № 2005106082/15; заявл. 04.03.2005; опубл. 10.07.2006, Бюл.№ 19.- 2 с.

23. Способ комплексной переработки древесины лиственницы: пат. 2361871 Рос.Федерация: МПК С07D 311/40, С07D 311/32, С08В 37/00, С09F 1/00 Нифантьев Э.Е., Телешев А.Т., Коротеев М.П., Казиев Г.З. ; заявитель и патентообладатель Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН (ИНЭОС РАН).- № 2007148678/04; заявл. 28.12.2007; опубл. 20.07.2009, Бюл.№ 20.- 1 с.

24. Способ получения дигидрокверцетина: пат. 2318528 Рос.Федерация: МПК А61К 36/15, А61К 31/35, С07D 311/40 Лифанов Е.В., Колотыгин О.А.; заявитель и патентообладатель Лифанов Е.В., Колотыгин О.А..- № 2006104515/04; заявл. 03.04.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл.№ 7.- 3 с.

25. Способ комплексной переработки древесины лиственницы: пат. 2233858 Рос.Федерация: МПК С09F 1/00, С08В 37/00, С07D 311/40 Нифантьев Э.Е., Коротеев М.П., Казиев Г.З., Кухарева Т.С.; заявитель и патентообладатель Нифантьев Э.Е., Коротеев М.П., Казиев Г.З., Кухарева Т.С..- № 2003101829/04; заявл. 23.01.2003; опубл. 10.08.2004, Бюл.№ 22.- 2 с.

26. Способ комплексной переработки отходов заготовки и переработки древесины лиственницы: пат. 2270218 Рос.Федерация: МПК С09F 1/00, С08В 37/00, С07D 311/32, С07D 311/40 Уминский А.А., Уминская К.А.; заявитель и патентообладатель ООО СП "Аркаим".- № 2004121546/04; заявл. 15.07.2004; опубл. 20.02.2006, Бюл.№ 5.- 1 с.

27. Способ комплексной переработки древесины лиственницы, способ выделения биофлавоноидов и способ выделения арабиногалактана, полученных в процессе комплексной переработки: пат. 2228943 Рос.Федерация: МПК С09F 1/00, С08В 37/00, С07D 311/40 Уминский А.А., Уминская К.А.; заявитель и патентообладатель Уминский А.А., Уминская К.А..- № 2003111027/04; заявл. 18.04.2003; опубл. 20.05.2004, Бюл.№ 14.- 3 с.

28. Способ выделения дигидрокверцетина: пат. 2180566 Рос.Федерация: МПК А61К 31/351, С07D 311/32, А61Р 29/00, А61Р 35/00, А61Р 39/06 Нифантьев Э.Е., Коротеев М.П., Казиев Г.З., Уминский А.А.; заявитель и патентообладатель Нифантьев Э.Е., Коротеев М.П., Казиев Г.З., Уминский А.А..- № 2001101592/14; заявл. 18.01.2001; опубл. 20.03.2002, Бюл.№ 8.- 2 с.

29. Способ получения дигидрокверцетина: пат. 2184561 Рос.Федерация: МПК А61К 35/78, А61Р 39/00 Хуторянский В.А., Юрьевич В.П.; заявитель Региональная общественная организация Институт эколого-технологических проблем, патентообладатель Региональная общественная организация Институт эколого-технологических проблем.- №

2001108812/14; заявл. 04.04.2001; опубл. 10.07.2002, Бюл.№ 19.- 2 с.

30. Состав биофлавоноидного комплекса сибел для пищевых и парфюмерных изделий и способ получения биофлавоноидного комплекса сибел для пищевых и парфюмерных изделий: пат. 2186097 Рос.Федерация: МПК C11B9/00, A23L1/30, A23L 1/29 Крапивкин Б.А., Колесник Ю.А., Рукосуев Г.Н.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Сибларекс".- № 2001118571/13; заявл. 06.07.2001; опубл. 27.07.2002, Бюл.№ 21.- 3 с.

31. Способ получения высокоочищенного дигидрокверцетина: пат. 2349330

Рос.Федерация: МПК A61K 36/00, B01D 15/08, B01D 15/42 Карасев В.С., Староверов С.М.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество "БиоХимМак СТ". № 2007137799/15; заявл. 15.10.2007; опубл. 20.03.2009, Бюл.№ 8.- 2 с.

32. Способ комплексной переработки хвои, коры и отходов заготовки и переработки древесины лиственницы и способ выделения дигидрокверцетина: пат. 2252220 Рос.Федерация: МПК C07D 311/40, B01J 20/24

Уминский А.А., Уминская К.А.; заявитель и патентообладатель Уминский А.А., Уминская К.А.- № 2004111864/15; заявл. 21.04.2004; опубл. 20.05.2005, Бюл.№ 14.- 1 с.

©А. В. Сафина – канд. техн. наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»); Р.Г. Сафин – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ»; А.Р. Хайрутдинова - магистрант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ»; Д.М. Сайфутдинов - магистрант кафедры «Переработка древесных материалов» ФГБОУ ВО «КНИТУ»; К.В. Валеев - магистрант кафедры «Переработка древесных материалов» ФГБОУ ВО «КНИТУ»; Л.Ш. Асаева - бакалавр кафедры «Переработки древесных материалов» ФГБОУ ВО «КНИТУ».

УДК 663.1

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ГИДРОЛИЗА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ МИНЕРАЛЬНЫМИ КИСЛОТАМИ

О.В. Ананьева, Р.М. Нуртдинов, А.С. Понкратов, Р.Т. Валеева, М.В. Шулаев

Проведена сравнительная оценка эффективности экспериментальных процессов гидролиза целлюлозы с сильными и слабыми минеральными кислотами при идентичных температурных режимах, концентрациях кислот и гидромодуле. Максимальные значения редуцирующих веществ получены при процессах гидролиза с сернистой кислотой при температуре 190°C и 3 % масс. концентрации кислоты.

Ключевые слова: гидролиз, целлюлоза, минеральные кислоты, редуцирующие вещества, гидролизаты.

A comparative evaluation of experimental processes of cellulose hydrolysis with strong and weak mineral acids under identical conditions of temperature, concentrations of acids and hydromodule. The maximum values of reducing substances were obtained during hydrolysis with sulfuric acid at a temperature of 190 °C and 3% mass concentration of acid.

Key words: hydrolysis, cellulose, mineral acids, reducing substances, hydrolysates.

Введение

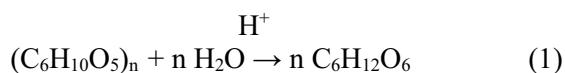
В условиях рыночной экономики на первый план выходят задачи повышения конкурентоспособности отечественного производства, для чего необходимо увеличить эффективность использования сырья и энергии,

в том числе и за счет внедрения современных биохимических и микробиологических технологий. Проблемы снижения себестоимости продукции особенно остро стоят перед предприятиями спиртовой, сахарной и молочной отраслей.

Гидролиз клетчатки (целлюлозы) и крахмала, являющихся обязательными компонентами, входящими в состав отходов зерновых культур, может осуществляться с использованием различных гидролизующих агентов.

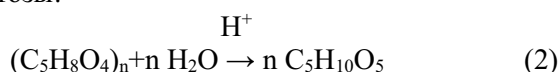
В макромолекуле целлюлозы гликозидные связи, соединяющие мономерные звенья, способны к гидролитической деструкции. В месте разрыва образуется одно редуцирующее концевое звено и одно нередуцирующее. Катализаторами процессов гидролиза могут служить сильные минеральные кислоты, образующие катион гидроксония [1].

При полном гидролизе целлюлозы получается D-глюкоза; общая схема процесса, отражающая конец и начало гидролиза без промежуточных стадий, имеет следующий вид:



Целлюлоза относится к трудно гидролизуемым полисахаридам. При действии разбавленных минеральных кислот, например, 2-5% HCl, при кипячении реакция гидролиза идет гетерогенно только в аморфных участках и постепенно через ряд промежуточных продуктов: целлюлоза → гидроцеллюлоза → целлодекстрины → олигосахариды → целлобиоза → D-глюкоза [2, 3].

До получения гидроцеллюлозы гидролиз идет быстро. Целлюлозные микрофибриллы распадаются на отдельные кристаллы. Легкогидролизуемые гемицеллюлозы и крахмалы гидролизуются разбавленными кислотами при температуре 100°C по такой же схеме, но в отличие от целлюлозы все стадии гидролиза гемицеллюлозы и крахмала идут быстрее. Пентозаны при гидролизе дают пентозы:



Чем больше концентрация ионов водорода, тем быстрее идет гидролиз. Поэтому в качестве катализатора чаще применяют сильные кислоты с большой степенью диссоциации. По каталитической активности кислоты располагаются в следующем порядке: HCl > HJ > HBr > H₂SO₄ > HNO₃ > H₃PO₄ > HCOOH > CH₃COOH [4-6]. В практике, в том числе в гидролизном производстве обычно применяют серную и соляную кислоты.

Под гидролизом растительного сырья понимают процесс превращения полисахаридов древесных или однолетних растений в простые сахара. Параллельно развиваются три направления этого процесса: гидролиз разбавленными минеральными кислотами при высоких температурах и давлении; концентрированными кислотами; разбавленными минеральными кислотами при атмосферном давлении.

Материалы и методы

С целью определения характеристик процессов получения питательных сред для биотехнологических производств на основе кислотных гидролизатов растительного сырья были проведены процессы гидролиза целлюлозы серной, соляной, фосфорной и сернистой кислотами при варьировании технологических параметров: температуры в диапазоне 150°C - 190°C, концентрации кислот 1 – 3% масс. и гидромодуле 1:5,8 [7-9].

В качестве целлюлозы использовали фильтровальную бумагу. Фильтровальную бумагу предварительно измельчали до размеров 1-3 мм и просушивали до постоянной величины в сушильном шкафу при температуре 120°C в течение 2 часов с целью получения точной навески сухого материала.

Процессы гидролиза целлюлозы проводили с использованием малогабаритных лабораторных установках высокотемпературного гидролиза [10-12] в термостатируемых капсулах объемом 30 мл, выполненных из нержавеющей стали марки 12X18H10T, которая практически не разрушается при контакте с жидкой фазой и незначительно корродирует при контакте с паровой фазой. Общая масса загрузки каждой капсулы составляла 75% от объема капсулы.

В ходе процессов гидролиза измеряли температуру, давление и pH гидролизатов. Полученные гидролизаты фуговали на центрифуге с охлаждением Rotina 380R. Образцы полученных фугатов анализировали в соответствии с методиками, принятыми в химии растительного сырья, на содержание редуцирующих веществ по методу Бертрана и сухих веществ с помощью влагомера «MX-50» при температуре высушивания 105°C и навеске не менее 1 г.

Абсолютная погрешность химического анализа ПВ во всех экспериментах составляла ± 0,3% масс. Погрешность реализации

экспериментов (максимальное средне-квадратичное отклонение по группам точек для разных моментов времени) составила по РВ от $\pm 0,4\%$ масс. до $\pm 0,53\%$ масс. Оценка воспроизводимости экспериментов при реализации всех процессов гидролиза была проведена по трем повторностям процессов для каждого параметра температуры и концентрации кислоты.

Для каждого проведенного процесса гидролиза целлюлозы определяли концентрации полисахаридов и редуцирующих веществ, конверсию исследуемого сырья, скорость проведенных процессов гидролиза и содержание редуцирующих веществ в сухих веществах.

Результаты

Экспериментальные и расчетные данные проведенных процессов гидролиза целлюлозы представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные проведенных процессов гидролиза целлюлозы минеральными кислотами

Концентрация кислоты, %	T ср, °C	Время, мин	РВ max, %	Конверсия, %	R, гРВ/л*час	Концентрация СВ, %	Содержание РВ в СВ, %
Соляная							
1	190	10	4,240	24,67	254,42	5,93	71,51
2	190	5	3,800	22,13	456,33	4,57	83,21
3	190	5	4,790	27,86	574,56	5,15	92,97
Серная							
1	190	15	3,669	21,34	146,76	5,26	69,76
2	170	10	4,581	26,65	274,86	6,41	71,47
3	180	20	4,926	28,66	147,78	8,42	58,51
Фосфорная							
1	190	60	3,239	18,85	32,40	5,20	62,29
2	190	40	3,537	20,58	53,05	6,82	51,86
3	190	60	4,961	28,87	49,61	8,84	56,12
Сернистая							
1	190	40	4,684	27,26	70,27	6,11	76,60
2	190	30	5,735	33,37	114,71	9,24	62,06
3	190	30	6,058	35,25	121,16	8,88	68,20

Как следует из полученных данных процессов гидролиза целлюлозы, при 150°C и изменении концентрации соляной кислоты в пределах 1 – 3% масс., максимум концентрации РВ в фугате гидролизата целлюлозы достигается соответственно через 60, 30 и 30

минут после начала процесса гидролиза. При 190°C и изменении концентрации соляной кислоты в пределах 1 – 3% масс., максимум концентрации РВ в фугате гидролизата целлюлозы достигается соответственно через 10, 5 и 5 минут после начала процесса гидролиза целлюлозы, при этом наблюдается двухкратное и более различие в накоплении редуцирующих.

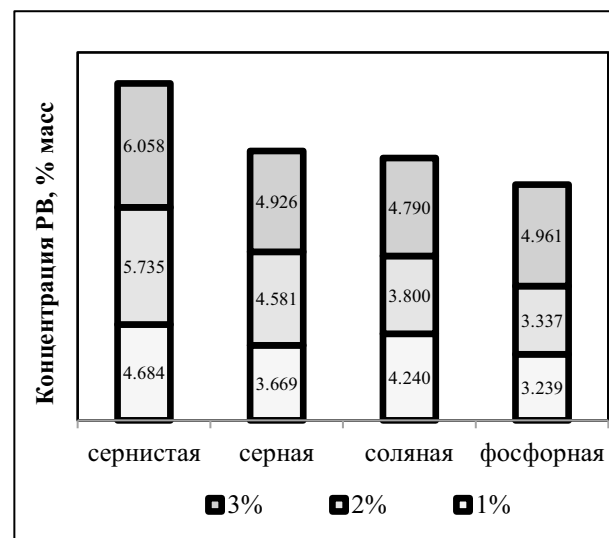


Рис. 1. Сравнительные данные максимальных значений редуцирующих веществ полученных в процессах гидролиза целлюлозы минеральными кислотами

В аналогичных экспериментах с серной кислотой при 150°C и изменении концентрации серной кислоты в пределах 1 – 3% масс., максимум концентрации РВ в фугате гидролизата целлюлозы достигается соответственно через 60, 40 и 30 минут после начала процесса гидролиза. При 190°C и изменении концентрации серной кислоты в пределах 1 – 3% масс., максимум концентрации РВ в фугате гидролизата целлюлозы достигается соответственно через 20-15 минут после начала процесса гидролиза целлюлозы, при этом различие в накоплении редуцирующих веществ незначительно. Не смотря на стабилизацию температуры с точностью $\pm 2^{\circ}\text{C}$, давление в гидролизере заметно росло с течением времени при использовании в качестве гидролизующего агента серной кислоты, что свидетельствует об образовании побочных летучих продуктов. В проведенных исследованиях высокотемпературного гидролиза целлюлозы редуцирующие вещества составляли около 66,58 % от общей массы растворимых веществ.

Из полученных данных процессов гидролиза целлюлозы сернистой кислотой следует, что увеличение концентрации сернистой кислоты приводит к смещению максимума концентрации РВ. При 150°C и изменении концентрации сернистой кислоты в пределах 1 – 3% масс., максимум концентрации РВ в фугате гидролизата целлюлозы достигается соответственно через 80 и 60 минут после начала процесса гидролиза целлюлозы. При 190°C и изменении концентрации сернистой кислоты в пределах 1 – 3% масс., максимум концентрации РВ в фугате гидролизата целлюлозы достигается соответственно через 40 и 30 минут после начала процесса гидролиза целлюлозы. Во всех экспериментах высокотемпературного гидролиза целлюлозы наилучшие результаты достигнуты при температуре 190°C и концентрации сернистой кислоты 3%. С увеличением концентрации сернистой кислоты 1-2%, СВ увеличивается в 2 раза первые 40 минут, далее увеличение снижается. С увеличением концентрации сернистой кислоты с 1% до 3%, СВ увеличивается в 3 раза. В проведенных исследованиях гидролиза целлюлозы редуцирующие вещества составляли около 68,95% от общей массы растворимых веществ.

Как следует из полученных данных процессов гидролиза целлюлозы фосфорной кислотой при концентрации фосфорной кислоты 1% и варьировании температуры в пределах 150– 190°C, максимум концентрации РВ в фугате гидролизата целлюлозы достигается через 80 – 60 минут после начала процесса гидролиза. При концентрации фосфорной кислоты 3% и при варьировании температуры в тех же пределах, максимум концентрации РВ в фугате гидролизата целлюлозы достигается через 50 – 60 минут после начала процесса гидролиза. При этом наблюдается рост содержания редуцирующих веществ от 1,3 до 4,9 % масс. С увеличением температуры и концентрации фосфорной кислоты в процессах гидролиза целлюлозы показатель рН уменьшался, а с увеличением времени процесса гидролиза рН увеличивался. Среднее содержание редуцирующих веществ от общей массы растворимых веществ составило около 49,29%, но при температурах 180 - 190°C содержание редуцирующих веществ от общей массы растворимых веществ возрастает. При дальнейшем повышении

температуры до 220°C величина максимального значения концентрации РВ изменяется не существенно (4,24% масс.), а продолжительность процесса гидролиза сокращается до 10 минут.

Заключение

Из сравнительного анализа оценок эффективности процессов гидролиза целлюлозы сильными и слабыми минеральными кислотами вытекает следующее:

- максимальные значения редуцирующих веществ получены при температуре 190°C, кроме процессов с серной кислотой при концентрации 2 и 3% масс.;
- с увеличением концентрации кислот с 1 до 3% масс. содержание редуцирующих веществ увеличивается, кроме процессов с соляной кислотой;
- продолжительность процессов гидролиза увеличивается в следующем порядке: соляная, серная, сернистая и фосфорная кислота;
- максимальные значения редуцирующих веществ получены в процессах с сернистой кислотой.

Из полученных данных, можно заключить, что предпочтительным является режим гидролиза целлюлозы фосфорной кислотой при 180 - 190 °C и концентрации кислоты не менее 2%.

Литература

1. Сушкова, В.И. Безотходная конверсия растительного сырья в биологически активные вещества / В.И. Сушкова, Г.И. Воробьева. – Киров, 2007. – 204 с.
2. Карпова, Г.В. Переработка аспирационных отходов зерноперерабатывающих предприятий в кормовые дрожжи / Г.В. Карпова, Р.Р. Зайнутдинов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – №7. – С.76-79.
3. Гадельшина, Г.А. Моделирование кинетики низкотемпературного гидролиза целлюлозосодержащего сырья серной кислотой / Г.А. Гадельшина, С.Г. Мухачев, Р.Т. Валеева, Р.М. Нуртдинов // Вестник Каз. технол. ун-та. – 2012. – Т.15. – №18. – С.203-206.
4. Ковернинский, И.Н. Комплексная химическая переработка древесины: учебное пособие / И.Н. Ковернинский; Арханг. гос. техн. ун-т. – Архангельск, 2002. – 347с.
5. Корольков, И.И. Перколяционный гидролиз растительного сырья /

И.И. Корольков. - М: Лесная промышленность, 1978. – 263 с.

6. Шарков, В.И. Технология гидролизных производств / В.И. Шарков [и др.] – М.: Лесная промышленность. – 1973. – 408 с.

7. Нуртдинов, Р.М. Исследование кинетики и оптимизация условий проведения процессов высокотемпературного гидролиза целлюлозы серной кислотой / Р.М. Нуртдинов, Н.С. Залалдинов, Р.Т. Валеева // Вестник технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 8. – С. 126-128

8. Нуртдинов, Р.М. Исследование кинетики и оптимизация условий проведения процессов гидролиза целлюлозы сернистой кислотой / Р.М. Нуртдинов, Л.Т. Фаттахова, Р.Т. Валеева, С.Г. Мухачев // Вестник технологического университета. – 2013. – Т.16. – №8. – С.124 – 125.

9. Валеева, Р.Т. Высокотемпературный гидролиз целлюлозы фосфорной кислотой /

Р.Т. Валеева, С.Г. Мухачев, С.Ю. Михайлова // Вестник технологического университета. – 2014. – Т.17. – №5. – С.135 – 137.

10. Мухачев, С.Г. Питательная среда для генерации биомассы сахаромикетов / С.Г. Мухачев, Р.Т. Валеева, Р.М. Нуртдинов // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2011. – №3. – С.20-23.

11. Нуртдинов, Р.М. Разработка биотехнологического комплекса переработки растительного сырья и отходов сельскохозяйственного производства // Р.М. Нуртдинов, [и др.] // Вестник технологического университета. – 2011. – №2. – С. 143-147.

12. Шагивалеев, И.В. Лабораторная установка высокотемпературного гидролиза с тепловым аккумулятором / И.В. Шагивалеев, Р.Т. Валеева, С.Г. Мухачев // Вестник технологического университета. – 2014. – №11. – С. 190-193.

© **О.В. Ананьева** - аспирант кафедры химической кибернетики, факультета пищевых технологии ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»); **Р.М. Нуртдинов** - канд. техн. наук, доцент кафедры химической кибернетики, факультета пищевых технологии ФГБОУ ВО «КНИТУ»; **А.С. Понкратов** - ассистент кафедры химической кибернетики, факультета пищевых технологии ФГБОУ ВО «КНИТУ»; **Р.Т. Валеева** - канд. техн. наук, доцент кафедры химической кибернетики, факультета пищевых технологии ФГБОУ ВО «КНИТУ» valrt2008@rambler.ru; **М.В. Шулаев** - д-р техн. наук профессор кафедры химической кибернетики, факультета пищевых технологии ФГБОУ ВО «КНИТУ».



Оптовые поставки гидрооборудования

www.gidrosila.ru

ООО "ГидроСила"

Тел: +7 (495) 787-01-89

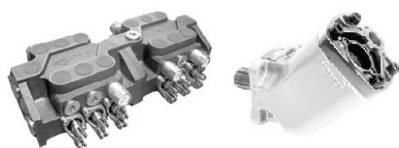
Моб: +7 (926) 354-53-82

E-mail: 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



Производство лесопильного
оборудования



(8443) 41-05-41
WWW.GRIZLY.RU

Лесопильные
линии

Угловые станки
"Гризли"

Брусующие
станки

Многопильные
станки

Кромкообрезные
станки

Горбыльные
станки

Торцовочные
станки

Заточные
станки

Околостаночное
оборудование