

На правах рукописи



**ДЕСНЕВ**

**Александр Николаевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЩЕПЫ НА ОТКРЫТЫХ СКЛАДАХ  
ЛЕСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 05.21.05 – Древесиноведение, технология и оборудование  
деревопереработки

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Архангельск 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова»

Научный руководитель: **Мелехов Владимир Иванович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Сафин Руслан Рушанович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технологический университет", кафедра архитектуры и дизайна изделий из древесины, заведующий кафедрой  
**Ермоченков Михаил Геннадьевич**  
кандидат технических наук, доцент, Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра проектирования объектов лесного комплекса, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

Защита диссертации состоится 12.12.2019 в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.008.01, созданного на базе ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» по адресу: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д.17, ауд. 1220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» и на сайте [www.narfu.ru](http://www.narfu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н.



Тюрикова  
Татьяна Витальевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В России ежегодно заготавливают 240-260 млн. м<sup>3</sup> древесины, основными потребителями которой являются лесопильная отрасль и целлюлозно-бумажное производство. Основная товарная продукция лесопильных предприятий - пиломатериалы и технологическая щепка. Выход технологической щепки на предприятиях составляет 38,38%, что соответствует 86 тыс. м<sup>3</sup> технологической щепки на 100 тыс. м<sup>3</sup> готовой пилопродукции. Технологическая щепка хранится в насыпных кучах на открытых складах предприятий в условиях неблагоприятного воздействия окружающей среды.

Из-за отсутствия должного контроля режима хранения складированной технологической щепки, внутри массива кучи возникают необратимые микробиологические и термодинамические процессы, нарушающие качественные характеристики щепки, приводящие к снижению кондиционности продукции и безвозвратной потере полезной массы древесины.

Одним из направлений решения рассматриваемой проблемы сохранения качества технологической щепки может быть совершенствование технологии хранения технологической щепки на открытых складах лесоперерабатывающих предприятий путем постоянного контроля и регулирования состояния измельченной древесины и отвода избыточной тепловой энергии из массива насыпной кучи щепки во внешнюю окружающую среду термосифонными теплоотводящими устройствами.

В проведенных ранее исследованиях не определены обоснованные решения проблемы сохранности качества технологической щепки при хранении. Необходимо определить новые научно-обоснованные подходы и предложить технические решения. Проведение целенаправленных исследований в этом направлении актуально.

**Объект исследования** – измельченная древесина (технологическая щепка), складированная на открытой площадке предприятия в форме насыпной кучи.

**Предмет исследования** – микробиологические и термодинамические процессы в массиве кучи складированной технологической щепки.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности ВАК РФ 05.21.05 – «Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки», п.: 1, 8, 14.

**Цель работы** – совершенствование технологии кучевого хранения технологической щепки на открытых складах лесоперерабатывающих предприятий путем регулирования температурно-влажностного режима в массиве кучи с применением энергоэффективных теплоотводящих устройств.

Для достижения цели определены **задачи**:

1. провести аналитический обзор исследований способов хранения технологической щепки и применения известных технических устройств для отвода избыточной тепловой энергии из массива кучи измельченной древесины;

2. создать математическую модель отвода избыточной тепловой энергии из массива кучи технологической щепы теплоотводящими устройствами во внешнюю окружающую среду;

3. разработать методику проведения исследований, создать экспериментальную базу для проведения исследований, определить теплофизические свойства измельченных древесных материалов, экспериментально определить изотермы и распределение влажности в массиве кучи технологической щепы в процессе хранения;

4. оценить энергетическую эффективность применения теплоотводящих устройств по отводу избыточной тепловой энергии из массива кучи технологической щепы во внешнюю окружающую среду;

5. предложить техническое решение эффективного теплоотводящего устройства для отвода избыточной тепловой энергии из массива кучи технологической щепы во внешнюю окружающую среду;

6. разработать проект производственной инструкции по безопасному хранению технологической щепы на открытых складах с применением теплоотводящих устройств.

#### **Научная новизна результатов исследований:**

В диссертационной работе разработаны и исследованы математические модели формирования тепловых потоков в массиве кучи технологической щепы и экологически безопасного отвода избыточной тепловой энергии мобильными термосифонными теплоотводящими устройствами из массива кучи во внешнюю окружающую среду, экспериментально получены характеристики тепловых полей в массиве кучи щепы, которые дополняют и развивают теоретические представления о формировании и характере протекания тепловых процессов в массиве измельченной древесины, что позволяет разработать научно обоснованные практические рекомендации по повышению эффективности хранения древесных измельченных продуктов.

#### **На защиту выносятся:**

1. Математические модели формирования тепловых полей в массиве кучи измельченной древесины, теплоотвода теплоотводящим устройством из массива кучи измельченной древесины во внешнюю среду, баланса тепла образующегося в эпицентре ядра и отводимого теплоотводящим устройством;

2. Результаты экспериментального исследования температурного поля в массиве технологической щепы в процессе длительного хранения на открытом складе;

3. Научно обоснованное технологическое решение регулирования температурно-влажностного режима в массиве насыпных измельченных древесных материалов при хранении на открытых площадках, путем отвода избыточной тепловой энергии термосифонными системами.

#### **Практическая значимость:**

Результаты работы позволяют усовершенствовать технологический процесс кучевого хранения щепы на открытых складах предприятий с сохранением требуемого качества технологической щепы, устранить возможность критической стадии биоразрушения и самовозгорания древесины

без привлечения коммерческого энергопотребления, обеспечить безопасные условия хранения.

**Методы исследования.** При проведении исследований использованы методы математического моделирования, натурального эксперимента, планирования экспериментальных исследований, теории вероятностей и математической статистики, с применением вычислительных программных комплексов и современного инструментального сопровождения.

**Достоверность результатов исследований** основывается на достаточном объеме теоретических и экспериментальных исследований с применением методов математического моделирования, хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Личный вклад автора** Автором проведен аналитический обзор работ по теме исследований, поставлены цель и задачи исследования, разработаны теоретические модели температурного поля в массиве кучи щепы, теплоотвода из массива кучи измельченной древесины мобильными и стационарными термосифонными теплоотводящими устройствами, определен баланс избыточной тепловой энергии в эпицентре ядра кучи и отводимой теплоотводящими устройствами во внешнюю окружающую среду, создана экспериментальная установка, разработана методика проведения исследований и аналитической обработке результатов исследования, проведен анализ полученных результатов, предложено инженерное решение систем для обеспечения энергоэффективного, экологически безопасного режима хранения технологической щепы на открытых площадках, сформулированы выводы и рекомендации, написаны статьи по теме исследований.

**Реализация результатов работы.** Рекомендации по безопасному хранению технологической щепы переданы на лесопильные предприятия, разработана производственная инструкция по безопасному хранению технологической щепы на открытых складах с применением теплоотводящих устройств, применённая на предприятиях: ОАО «Лесозавод-2», ОАО «Северное лесопромышленное товарищество Лесозавод-№3», ЗАО «Лесозавод-25», ОАО «Соломбальский лесопильно-деревообрабатывающий комбинат», ООО «Даммерс».

**Апробация работы.** Основные результаты и научные положения представлены на научно-практических конференциях: на международной научно-практической конференции «Биоэнергетика и биотехнологии - эффективное использование отходов лесозаготовок и деревообработки», Мытищи 2009; на международной научно-технической конференции «Современная наука и образование в решении проблем экономики Европейского Севера», посвященной 80-летию Архангельск 2010; на 6 международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса», Вологда 2010; на 4 международной научно-практической Интернет-конференции «Леса России в XXI веке»; 7 международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса», Вологда 2010; на всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Образ

технологического будущего России», Йошкар-Ола 2015.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 12 печатных работ, 4 из которых в журналах, включенных в перечень изданий рекомендованных ВАК, в том числе 1 в реферативной базе Web of Science.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка, включающего 114 наименований, изложена на 152 страницах, содержит 59 рисунков, 25 таблиц, 2 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены основные положения диссертации, выносимые на защиту, обоснована научная новизна.

**В первой главе** проведен анализ работ по теме диссертации. Представлен процесс выработки измельченной древесины на лесоперерабатывающих предприятиях. Определена структура терминов и определений, используемых в работе. Рассмотрена динамика изменения соотношений выпускаемой продукции и измельченной древесины на лесопильных предприятиях Архангельского региона. Отмечено, что внедрение современных технологий в лесопиление позволило увеличить производительность за счет применения новых технических решений, однако при этом относительный выход пиломатериалов по сырью снизился на 5,69 %, а выработка технологической щепы увеличилась на 4,27 – 4,5 %, что составляет 86 тыс.м<sup>3</sup> технологической щепы на 100 тыс.м<sup>3</sup> готовой пилопродукции. Основная масса полученной в технологическом процессе щепы хранится в насыпных кучах на открытых складах предприятий в условиях неблагоприятного воздействия окружающей среды.

Проанализирован процесс хранения измельченной древесины в организованных кучах на лесоперерабатывающих предприятиях. Отмечено, что открытый способ хранения технологической щепы имеет ряд существенных недостатков: развитие биохимических процессов внутри массива щепы, вызывающих разрушение древесины; самопроизвольное нагревание щепы и самовозгорание; потери легкогидролизуемых и смолистых веществ; загрязнение минеральными примесями под воздействием негативных факторов окружающей среды; смерзание наружных слоев; потемнение и разрушение древесины под воздействием солнечной радиации. Открытый способ хранения технологической щепы на предприятии требует контроля за сохранностью древесины на протяжении всего производственного процесса и протекающими биопроцессами в массиве кучи щепы. На практике это не всегда доступно и является проблемным вопросом, требующим изучения и разработки соответствующих технических решений

Проведен анализ факторов разрушения древесины. Рассмотрены результаты исследований деструкции древесины, которые ранее проводили В.Л. Омелянский, Б.Г. Тидеман, П.Г. Демидов, В.В. Трутенько, С.Н. Горшин.

Отмечено, что агентами биоразрушения древесной щепы являются живые термофильные микроорганизмы, способные оказывать на древесину разрушающее воздействие и привести к самовозгоранию фракции. Дано описание развития и условий процесса самовозгорания технологической щепы.

Определен характер и способы обеспечения сохранности измельченной древесины при кучевом хранении. Отмечено, что до настоящего времени задача по сохранению качественных характеристик технологической щепы при кучевом хранении полностью не решена. Базовым решением проблемы может быть способ хранения больших объемов технологической щепы в кучах на открытых площадках путем контроля и регулирования температурно-влажностного режима в массиве с применением технических устройств.

Приведен аналитический обзор способов и устройств, применяемых для отвода тепла из массива кучи измельченной древесины. Исследованием сохранности кондиционных свойств технологической щепы при кучевом хранении больших объёмов открытым способом занимались С. Н. Абилевский, А.А. Андреев, И.В. Бачерников, М.И. Брик, С. Б. Васильев, М.Н. Волчанова, О.Н. Галактионов, С.Н. Горшин, Н.А. Доспехова, А. В. Житков, В.С. Копарев, О.А. Куницкая, Б.М. Локштанов, С.М. Мазарский, В.И. Мелехов, В.М. Меркелов, Г. М. Михайлов, Л. К. Молотков, Н.И. Никитин, А.Н., Орлов, И.А. Полянин, Ю.А. Пушкин, В.Б. Снопков, В.В. Труттько, О.В. Чибирев и др.

Рассмотрена возможность создания технического решения для эффективного отвода тепла из массива технологической щепы термосифонной системой на основе тепловых труб. Опытами по трансформации тепловых труб в инновационные системы охлаждения различных отраслей промышленности занимались Д. Гровер в Лос-Аламосской национальной лаборатории, Э. Брэн в Лаборатории термоаэродинамики в Медоне (Париж), М. Гролем Штутгартском университете, Л.Л. Васильев и А.С. Журавлев в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, А. В. Овсянник в Гомельском государственном технический университете имени П.О. Сухого, С.С. Кутателадзе в институте теплофизики СО РАН и другие ученые.

Для обоснования эффективности применения предложенного решения необходимо провести целенаправленные теоретические и экспериментальные исследования процесса отвода тепла из массива кучи технологической щепы с применением энергоэффективных теплоотводящих устройств.

**Во второй главе** рассмотрена динамика теплообмена в массиве кучи измельченной древесины, разработан поэтапный алгоритм изменения состояния щепы в массиве, дано детальное описание и приведены схематические изображения этапов с течением времени. Кратко указаны упрощающие предположения, которые позволяют выполнить первичный анализ более наглядным и выявить определяющие факторы, влияющие на тепловые процессы в массиве кучи щепы.

Приведены разработанные автором математические модели формирования тепловых полей в массиве кучи измельченной древесины, теплоотвода теплоотводящим устройством из массива кучи измельченной

древесины во внешнюю среду, баланса тепла образующегося в эпицентре ядра и отводимого теплоотводящим устройством. Принимаем, что куча щепы имеет правильную симметричную коническую форму, а ось симметрии перпендикулярна основанию кучи. Для создания математической модели тепловых полей в куче щепы принята цилиндрическая система координат (рисунок 1).

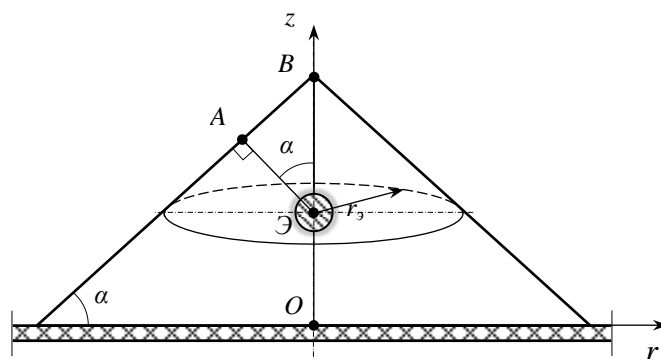


Рисунок 1. Модель кучи щепы в цилиндрической системе координат

$\mathcal{E}$  – эпицентр ядра кучи,  $r_э$  – радиус кучи на участке эпицентра,  $S_э$  – площадь поверхности на участке эпицентра ядра,  $A$  – ближайшая точка на поверхности кучи от эпицентра ядра,  $B$  – вершина кучи щепы

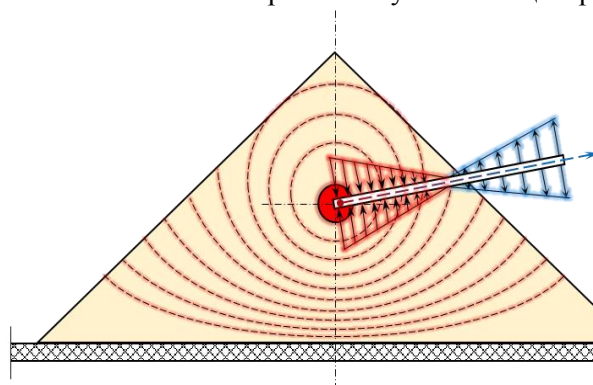


Рисунок 2. Отвод тепла из массива кучи измельченной древесины теплоотводящим термосифонным устройством во внешнюю среду

Для модели формирования тепловых полей в массиве кучи измельченной древесины разностное уравнение модифицируется, поскольку производные на границе заменяются на свои выражения в силу граничных условий 3-го рода. Уравнение поверхности кучи щепы в плоском сечении, проходящем через ее ось симметрии ( в координатах  $(r, z)$ ) имеет вид:

$$z = Z(r) \tag{1}$$

В рассматриваемом случае для кучи конической формы

$$z = b_2 - b_1 r \tag{2}$$

Тогда запись в дифференциальной форме уравнений математической модели формирования тепловых полей в массиве кучи измельченной древесины:



$$\begin{aligned}
& \frac{u(r, Z(r), t + \tau) - u(r, Z(r), t)}{\tau} = \\
& = \left[ k \frac{u(r + h_r, Z(r), t) - u(r, Z(r), t)}{h_r^2} \right. \\
& + \alpha \frac{u_{\text{ВН}} - u(r, Z(r), t)}{h_r} \langle \vec{n}(Z(r)), \vec{e}_r \rangle \\
& + k \frac{u(r, Z(r) + h_z, t) - u(r, Z(r), t)}{h_z^2} \\
& \left. + \alpha \frac{u_{\text{ВН}} - u(r, Z(r), t)}{h_z} \langle \vec{n}(Z(r)), \vec{e}_z \rangle + \langle \dots \rangle \right] \quad (3)
\end{aligned}$$

Для написания модели теплоотвода теплоотводящим устройством из массива кучи измельченной древесины во внешнюю среду принимаем, что площадь теплообменной поверхности нижней части корпуса устройства, - зоне нагрева, равен  $S_1$ , коэффициент теплопередачи между средой (кучей щепы) и теплоносителем (через стенку тепловой трубы) равен  $\alpha_1$ . Пусть  $S_2$  и  $\alpha_2$  – соответствующие параметры для конца тепловой трубы, расположенного в холодной зоне (рисунок 2). Пусть  $M_1$  – массовый расход рабочего тела (количество испаряющегося теплоносителя под воздействием теплового потока зоны нагрева) в единицу времени,  $M_2$  – масса теплоносителя, конденсирующаяся в верхней части корпуса - в зоне охлаждения в единицу времени,  $t_1$  – время движения порции  $M_1$  испарившегося теплоносителя из зоны нагрева тепловой трубы в зону охлаждения,  $t_2$  – время движения порции  $M_2$  сконденсировавшегося теплоносителя зоны нагрева тепловой трубы в зону охлаждения  $u_s$  – температура теплоносителя,  $q_s$  – удельная теплота испарения (конденсации) теплоносителя. Тогда, если  $M$  – полный запас конденсированного теплоносителя в тепловой трубе, то теплоотвод:

$$M_1(t)q_s = \alpha_1 S_1 (u - u_s) \quad (4)$$

$$M_2(t)q_s \leq \alpha_2 S_2 (u_s - u_{\text{ВН}}) \quad (5)$$

$$M_2(t) \leq M_1(t - t_1) \quad (6)$$

$$\frac{dM}{dt} = M_2(t - t_2) - M_1(t) \quad (7)$$

$$M(t) \geq 0 \quad (8)$$

Приведенные соотношения описывают «штатный» режим работы тепловой трубы. Действительно, при  $u < u_s$  рабочее тело не осуществляет теплоотвод от эпицентра разогрева. При  $M(t) = 0$  рабочее тело работает в режиме теплообменника замкнутого цикла, который не является для него эффективным. Более того, полное испарение и последующий сильный нагрев

рабочего тела во внутреннем объеме корпуса тепловой трубы может рассматриваться как предаварийная или аварийная ситуация.

Для математической модели баланса тепла образующегося в эпицентре ядра и отводимого теплоотводящим устройством запись в дифференциальной форме уравнений учетом градиента температуры в горячей зоне может быть представлена в виде:

$$c_{eff} \frac{\partial u_0}{\partial t} = S_0 \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa_{eff} \frac{\partial u_0}{\partial x} \right) + \frac{\alpha_1 S_1 (u - u_{tr})}{l_1} \quad (9)$$

Таким образом, на формирование тепловых полей и плотность потока влияет влажность древесины и насыпная плотность. Режим работы теплоотводящего устройства существенно зависит от предыстории возрастания тепловой нагрузки во времени, или как принято говорить в теплотехнике, от режима пуска устройства в работу. Для уточнения и проверки на адекватность рассмотренных математических моделей динамики теплоотода тепловыми трубами из массива кучи измельченной древесины проведены экспериментальные исследования.

**В третьей главе** приведена методика экспериментального исследования, включающая три направления в соответствии с рассматриваемыми математическими моделями: оценки температурного поля в массиве кучи щепы при открытом хранении; определения температурной характеристики теплоотводящего элемента; исследования баланса тепла образующегося в эпицентре ядра кучи и отводимого тепловыми трубами для стабилизации температурно-влажностного режима внутри массива кучи. Экспериментальные исследования проводили по однофакторным и многофакторным планам в соответствии с разработанными методическими сетками опытов.

В первой части главы приведена методика исследование температурного поля в массиве кучи щепы при открытом хранении. Для проведения экспериментальных исследований по распределению температурного поля в массиве кучи технологической щепы в июле на грунтовой площадке открытого склада ОАО «Соломбальский ЦБК» была сформирована экспериментальная куча щепы из древесины хвойных пород (ель - 70%, сосна - 30%) объемом 102 м<sup>3</sup> в форме правильного конуса (рисунок 3). Наблюдения проводили в течение 18 месяцев с применением разработанной экспериментальной термосифонной установки и соответствующего инструментального сопровождения.

Замеры температуры выполняли с помощью термометра Velleman Digital thermometer DTP1N (рисунок 5). Для формирования измерительной лунки, применялся заостренный с одного конца деревянный шест длиной 2 м, диаметром 0,03 м.

План замеров (рисунок 4) включает 47 наблюдений вдоль вертикальной оси кучи и по 14 наблюдений на глубине 2 м от боковой поверхности кучи с северной, южной, западной и восточной стороны. Каждое наблюдение повторяли по 4 раза с шагом замеров 0,2 м. Выполнено 1570 замеров.

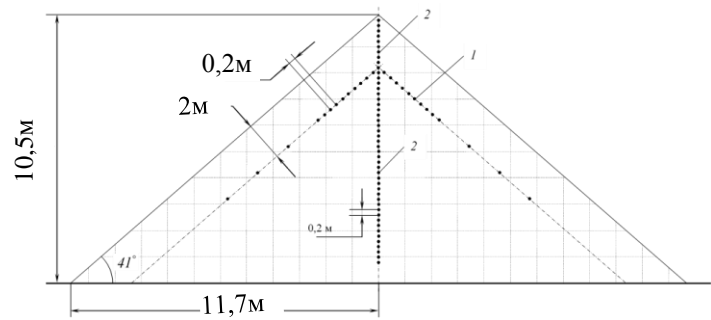


Рисунок 3. Экспериментальная куча щепы Рисунок. 4 План замеров температуры в массиве щепы

Температура  $i$ -го наблюдения с  $k$ -й стороны света  $\bar{T}_{ik}^{\delta}$ , °С рассчитывалась как среднее арифметическое значение четырех  $j$ -х замеров

$$\bar{T}_{ik}^{\delta} = \frac{\sum_{j=1}^4 T_{ijk}^{\delta}}{4} \quad (10)$$

где  $T_{ijk}^{\delta}$  – температура  $j$ -го замера  $i$ -го наблюдения с  $k$ -й стороны света, °С.

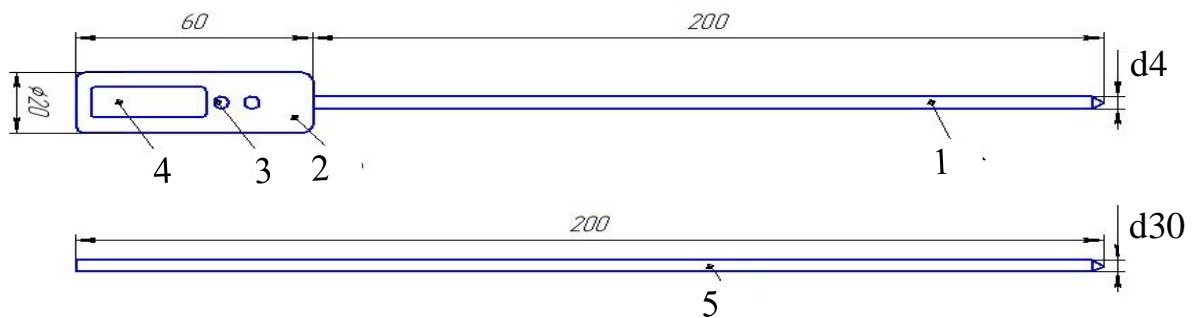


Рисунок 5. Термометр Velleman Digital thermometer DTP1N: 1 – зонд; 2 – измеритель температуры; 3 – переключатель режимов работы термометра; 4 – цифровой дисплей; 5 – деревянный шест.

Во второй части главы представлено экспериментальное термосифонное устройство на основе тепловой трубы (рисунок 6), приведена методика экспериментального исследования его температурной характеристики, проведена тарировка.

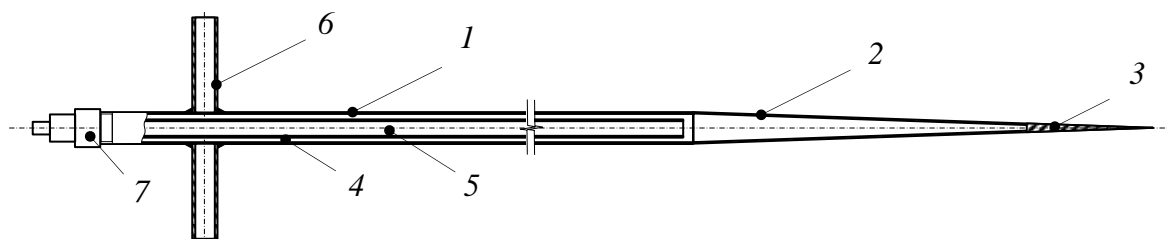


Рисунок 6. Конструкция экспериментального устройства: 1 – цилиндрическая часть корпуса; 2 – коническая часть корпуса; 3 – наконечник; 4 – паровой канал; 5 – артерия; 6 – рычаг; 7 – торцевая крышка

В качестве жидкого рабочего тела использовали ацетон с температурой кипения 56°С. Температура окружающего воздуха при проведении исследований составляла  $T_{o,cp}$  16°С. Экспериментальное устройство установили

вертикально. Транспортный участок корпуса изолировали пористым материалом. Испарительная зона корпуса помещалась в нагретую среду. План эксперимента предусматривал два переменных фактора: температура нагретой среды  $T_{н.сп}$ , °С; объем теплоносителя  $V_{тн}$ , мл. Для каждого фактора было выбрано пять уровней. Измеряли температуру на корпусе в зоне испарения  $T_{и}$  °С и в зоне конденсации  $T_{к}$  °С, затем определяли температурный напор  $\Delta T$ .

В третьей части главы приведена методика исследования баланса тепла образующегося в эпицентре ядра и отводимого теплоотводящим устройством для стабилизации температурно-влажностного режима внутри массива кучи.

Предмет исследования – теплофизические свойства измельченной древесины: теплопроводность; коэффициент теплопроводности  $\lambda$ ,  $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ К}$ ;

На теплофизические свойства насыпных древесных материалов влияют факторы, относящиеся к древесине, воздуху, насыпному материалу.

Наибольшее влияние на теплопроводность насыпных древесных материалов оказывают следующие факторы: вид насыпного материала; насыпная плотность  $\rho_{н}$ ; влажность древесины  $W_{д}$  и влажность воздуха  $W_{в}$ ; скважистость  $s$ ; размеры частиц (длина  $l_{ч}$ , мм; ширина  $b_{ч}$ , мм; толщина  $h_{ч}$ , мм; угол среза  $\alpha$ , град.); порода древесины.

Метод определения теплопроводности принят по ГОСТ 30256-94. «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом». В качестве прибора применяли измеритель теплопроводности материалов «МИТ-1». Принцип действия прибора основан на измерении приращения температуры измерительного зонда за определенное время при его нагреве с постоянной мощностью. Диаметр зонда 6,0 мм, при измерении он должен быть помещен внутрь образца с обеспечением максимального теплового контакта зонда с образцом.

Разработан алгоритм расчёта баланса тепла в эпицентре ядра кучи технологической щепы и отводимого во внешнюю окружающую среду.

В условиях стационарного теплового состояния эпицентра ядра кучи (цилиндрического либо сферического дисперсного тела), тепловой поток описывается законом Фурье:

$$\Delta T_{\text{эяк}} = \frac{Q}{L} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial u} 2\pi r. \quad (11)$$

При стационарном процессе теплоотвода, постоянном удельном тепловом потоке в активных зонах экспериментального теплоотводящего устройства ( $q_w = \text{const}$ ) и ламинарных потоках режима движения жидкости и пара в корпусе, максимально отводимый во внешнюю окружающую среду тепловой поток определяем из выражения:

$$\Delta T_{\text{эту}} = \frac{(T_{и} - T_{п})}{\Delta R_{\text{эту}} \left( \frac{1}{F_{и}} + \frac{1}{F_{к}} \right)} 2\pi r. \quad (12)$$

где  $\Delta R_{\text{эту}}$  - коэффициент термического сопротивления экспериментального теплоотводящего устройства:

$$\Delta R_{\text{эту}} = \frac{\delta\phi}{\lambda\phi} + \frac{\delta\sigma}{\lambda\sigma}. \quad (13)$$

Уравнение теплового баланса тепла образующегося в эпицентре ядра кучи технологической щепы и отводимого экспериментальным теплоотводящим устройством во внешнюю окружающую среду примет вид:

$$\Delta T_{\text{эяк}} = n \Delta T_{\text{эту}} \quad (14)$$

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований.

По результатам первичной обработки построены графики распределения температуры технологической щепы по высоте кучи вдоль ее вертикальной оси и на глубине 2 м от ее боковой поверхности (рисунок 7а) и график распределения влажности щепы по высоте кучи (рисунок 7б).

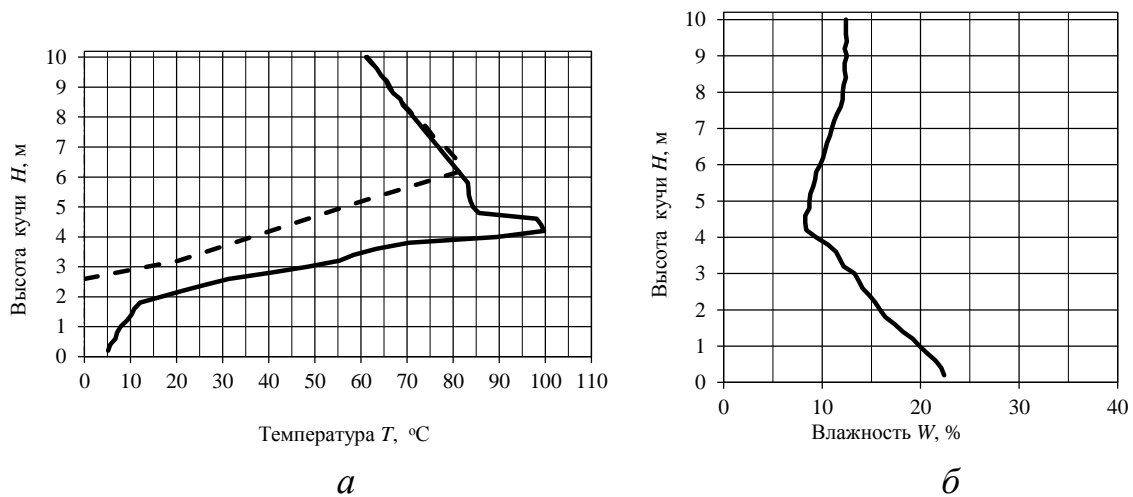


Рисунок 7. Распределение показателей в массиве кучи щепы: а) температуры б) влажности.

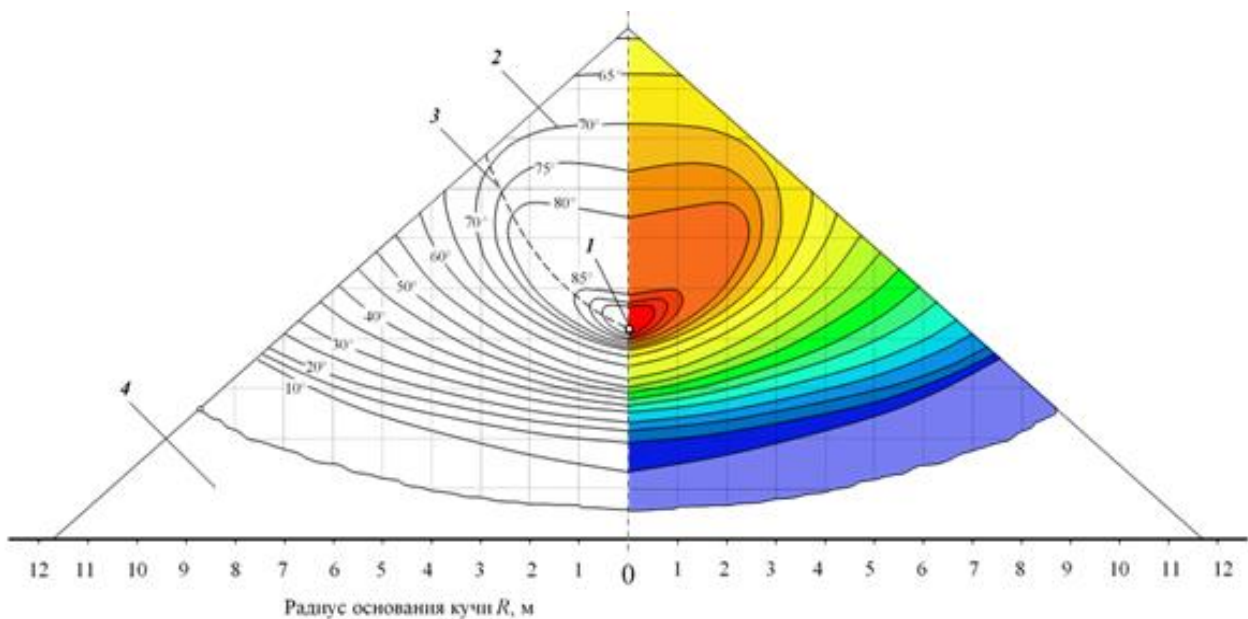


Рисунок 8. Температурное поле внутри массива кучи щепы: 1 – точка максимальной температуры щепы 99,7°C; 2 – изотерма; 3 – траектория интенсивного теплообмена; 4 – обледеневшая щепка.

Распределение теплового поля в массиве кучи и траектория интенсивного теплообмена (рисунок 8) определяется плавным соединением точек изотерм, максимально удаленных от эпицентра температуры.

Оценка различия результатов экспериментальных исследований и моделирования температурного поля кучи щепы осуществлялась по четырем параметрам: положению эпицентра по высоте  $H_э$ , м; углу траектории интенсивного теплообмена  $\gamma$ , град.; кривизне траектории интенсивного теплообмена  $f$ , м; высоте расположения изотермической линии по вертикальной оси кучи  $H$ , м.

Установлено, что тепловое поле в массиве кучи совпадает с расчетным, что позволяет сделать вывод об адекватности математической модели и корректности ее применения для расчетов.

Регрессионный анализ результатов позволил установить зависимость температурного напора  $\Delta T$ , °С от температуры нагретой среды  $T_{н.ср}$ , °С и объема рабочего тела экспериментального теплоотводящего элемента  $V_{ж}$ , мл

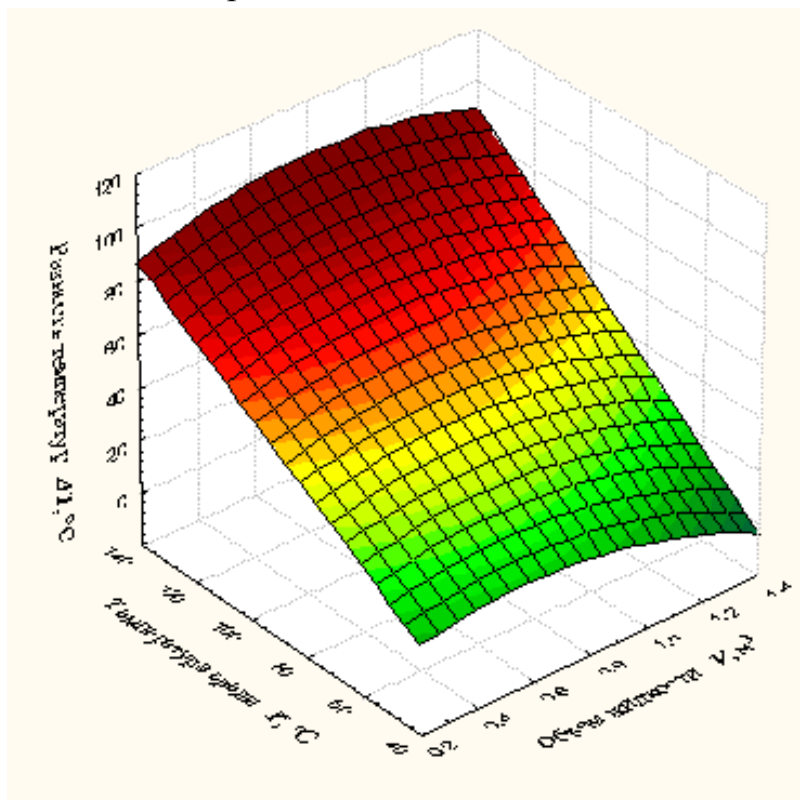


Рисунок 9. Взаимосвязь температурного напора  $\Delta T$  теплоотводящего устройства, температуры нагретой среды  $T_{н.ср}$  и объема жидкого рабочего тела  $V_{ж}$ .

$$\Delta T = -19,091 + 30,489V_{ж} + 0,673T_{н.ср} - 32,514V_{ж}^2 + 0,170V_{ж}T_{н.ср} + 0,0001T_{н.ср}^2 \quad (15)$$

Температурный напор  $\Delta T$  линейно зависит от температуры в зоне нагрева  $T_{н.ср}$  и значимо зависит от объема жидкого рабочего тела  $V_{ж}^2$  в корпусе. Следовательно, можно определить объем жидкого рабочего тела в корпусе устройства, при котором отвод избыточной тепловой энергии наиболее эффективен. В нашем случае объем жидкого рабочего тела 0,6...0,8 л (рисунок 10).

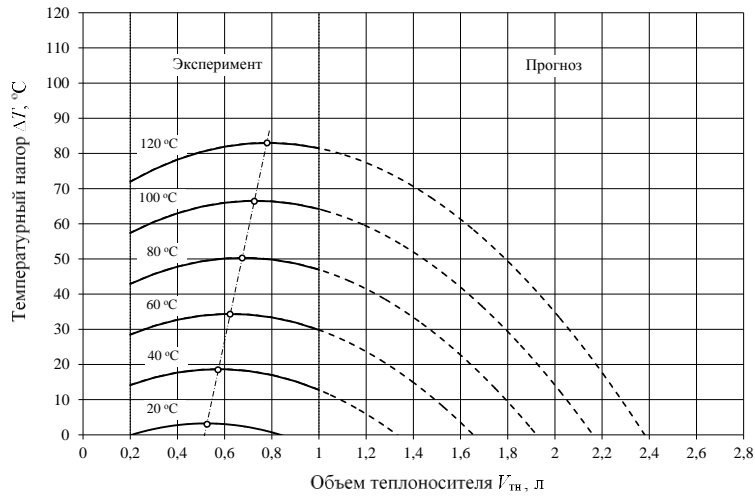


Рисунок 10. Рекомендованный объем жидкого рабочего тела.

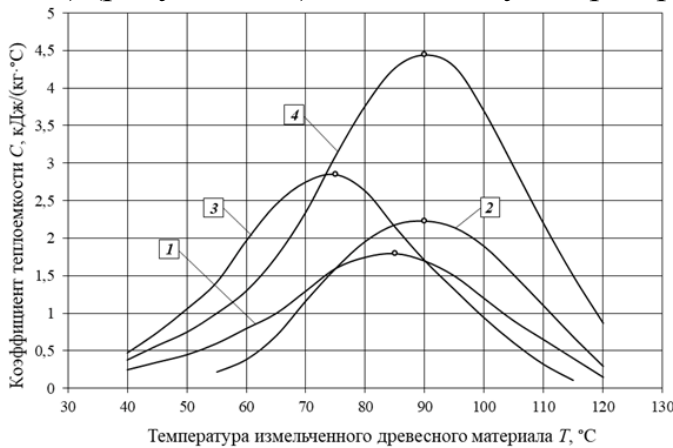
В результате корреляционного анализа получены математические модели зависимости коэффициента теплопроводности различных древесных насыпных измельченных материалов от их влажности (таблица 1).

Таблица 1

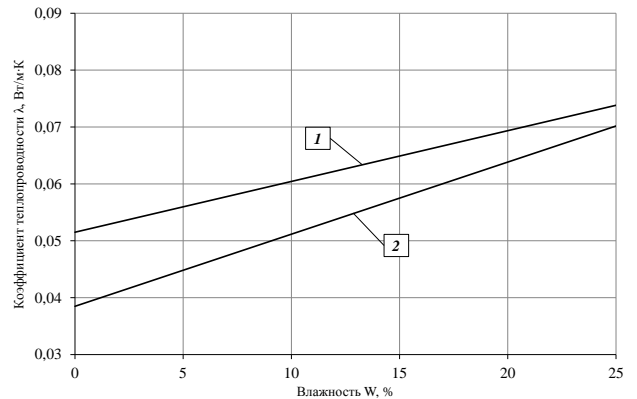
Коэффициент теплопроводности измельченной древесины в зависимости от влажности

№	Вид насыпного материала	Порода	Математическая модель	$r^2$
1	щепа	сосна	$\lambda_{щ.с} = 0,0009W_{щ.с} + 0,0515$	0,77
2	щепа	ель	$\lambda_{щ.е} = 0,0013W_{щ.е} + 0,0385$	0,76
3	опилки	сосна	$\lambda_{о.с} = 0,0022 W_{о.с} + 0,0623$	0,99
4	опилки	ель	$\lambda_{о.е} = 0,0018 W_{о.е} + 0,0511$	0,97
5	отсев	ель	$\lambda_{от.е} = 0,0026W_{от.е} + 0,0518$	0,99
6	кора	ель	$\lambda_{к.е} = 0,0019 W_{к.е} + 0,0458$	0,90

Определена зависимость коэффициента теплопроводности измельченной древесины  $\lambda$ , (Вт/м·К) от влажности  $W$ , (%) (рисунок 11а) и температуры  $T$ (°C) (рисунок 11б) в массиве кучи при хранении открытым способом.



а



б

Рисунок 11. Зависимость коэффициента теплопроводности измельченной древесины:  
а – от температуры, б – от влажности

**По результатам экспериментального исследования температурного поля в массиве кучи технологической щепы установлено:**

- Температура в эпицентре кучи щепы достигает 99,7...95,0 °С. Эпицентр температуры расположен на высоте 4,2 м от основания кучи, что на 0,19 м (4,3%) ниже расчетного;

- Напряженность температурного поля внутри кучи неодинакова в различных направлениях по вертикальной оси кучи. Вверх от эпицентра, напряженность в 3,0...4,5 раза больше, чем вниз;

- Плотность теплового потока наименьшая вдоль траектории интенсивного теплообмена, которая имеет кривизну 0,5 м и расположена под углом 40° к вертикальной оси кучи, что на 2,5 % меньше расчетного;

- Изотермы группируются вокруг эпицентра температуры и имеют эллиптическую форму различной кривизны.

**При экспериментальном исследовании температурной характеристики мобильного теплоотводящего устройства:**

- Доказана возможность эффективного отвода избыточной тепловой энергии из массива кучи технологической щепы мобильным теплоотводящим устройством на основе замкнутого термосифонного элемента – тепловой трубы, определены его температурные характеристики;

- Получена зависимость температурного напора теплоотводящего устройства от параметров нагретой среды и объема рабочего тела в корпусе устройства, уточняющая расчетную математическую модель:

$$\Delta T = -19,091 + 30,489V_{\text{ж}} + 0,673T_{\text{н.ср}} - 32,514V_{\text{ж}}^2 + 0,170V_{\text{ж}}T_{\text{н.ср}} + 0,0001T_{\text{н.ср}}^2$$

Установлено, что температурный напор  $\Delta T$  линейно зависит от температуры в зоне нагрева  $T_{\text{н.ср}}$  и значимо зависит от объема рабочего тела  $V_{\text{ж}}^2$ ;

- Рекомендуемый объем жидкого рабочего тела для экспериментального мобильного теплоотводящего устройства 0,6 ... 0,8 л.

**По результатам экспериментального исследования теплофизических свойств измельченной древесины установлено:**

- Получена зависимость теплопроводности и теплоемкости измельченной древесины от температурно-влажностных условий хранения, позволяющая уточнить расчетную математическую модель. Теплопроводность насыпных древесных материалов увеличивается пропорционально повышению влажности материала. Относительная погрешность составила 1,3 ... 6,0%;

- Установлено, что теплопроводность измельченной древесины в 2,2... 3,6 раза, а теплоемкость в 1,5...2,0 раза меньше показателей свойств цельной древесины при сопоставимых значениях влажности и температуры;

- При влажности  $W \approx 0$  % наименьший коэффициент теплопроводности у технологической щепы ели 0,0385 Вт/м·К наибольший у отсева ели 0,0518 Вт/м·К. При увеличении влажности  $W$  до 25% коэффициент теплопроводности повышается в 1,4...2,3 раза по сравнению с образцами влажностью  $W \approx 0$  % . Наибольшее увеличение коэффициента теплопроводности наблюдается у отсева из древесины ели, наименьшее у сосновой щепы;





размещение радиатора над поверхностью кучи. Для визуального контроля и оперативного управления процессом теплоотвода на радиаторе установлены три маломощных термоиндикаторных светодиода, настроенных на температурный режим 50, 60, 70°C. При достижении температуры 50°C, включается один светодиод. Одновременно в корпусе устройства происходит закипание жидкого рабочего тела в корпусе и начинается процесс теплообмена. При достижении температуры 60°C включаются два светодиода. Процесс кипения жидкого рабочего тела переходит в максимально допустимое состояние, что не снижает режим работы мобильного устройства и производительность теплоотвода. При достижении температуры 70°C включаются три светодиода. Жидкое рабочее тело в корпусе теплоотводящего устройства полностью переходит в газообразную фазу, а эффективность теплоотвода не повышается, что свидетельствует о критическом температурном состоянии в массиве кучи технологической щепы (70-75°C), при котором микробиологические процессы внутри массива интенсифицируются, и происходит стремительная деструкция и разложение древесины. Для эффективного отвода избыточной тепловой энергии необходимо дополнительно установить в массив кучи технологической щепы теплоотводящие устройства.

Предложены варианты конструкции теплоотводящего устройства с групповым размещением тепловых элементов и конструкция штатного стационарного устройства для отвода избыточной тепловой энергии из массива кучи технологической щепы. Разработанные технические решения теплоотводящих устройств могут быть применены в комбинированных схемах расположения теплоотводящих элементов в массиве кучи. Применение предложенных технических решений теплоотводящих устройств позволяют эффективно решить проблему безопасного, энергоэффективного хранения технологической щепы, обеспечив сохранность нормативных качеств измельченной древесины

### **Общие выводы и рекомендации**

1. Совершенствование технологии кучевого хранения технологической щепы на открытых складах лесоперерабатывающих предприятий позволило создать конструктивные решения теплоотводящих устройств, с помощью которых возможно контролировать и регулировать температурно-влажностный режим в массиве кучи щепы, сохраняя полезную массу древесины, качество складированной щепы на протяжении всего периода хранения;

2. Проведенный анализ исследований по хранению технологической щепы по применению известных способов и устройств, применяемых для отвода тепла из массива кучи измельченной древесины, позволил сделать вывод о невозможности достижения эффективного результата по сохранности технологической щепы общеизвестными способами;

3. Разработана математическая модель процесса теплоотвода избыточной тепловой энергии из массива кучи теплоотводящими устройствами в окружающую внешнюю среду;

4. Предложена научно обоснованная инженерная методика проведения исследований, создана экспериментальная база для проведения исследований, определены теплофизические свойства измельченных древесных материалов, экспериментально исследованы и построены изотермы и распределение влажности в массиве кучи технологической щепы в процессе хранения, определен баланс тепла образующегося в массиве и отводимого теплоотводящим устройством;

5. Создана и экспериментально подтверждена математическая модель баланса процесса теплоотвода избыточной тепловой энергии из массива кучи теплоотводящими устройствами в окружающую внешнюю среду для создания безопасного режима хранения технологической щепы;

6. Экспериментально установлено, что напряженность температурного поля внутри массива кучи неодинакова в различных направлениях. Вверх от эпицентра, напряженность в 3,0...4,5 раза больше, чем вниз, а изотермы группируются вокруг эпицентра температуры и имеют эллиптическую форму различной кривизны;

7. Экспериментально установлено, что показатели теплопроводности у измельченной древесины в 2,2...3,6 раза, а показатели теплоемкости в 1,5...2,0 раза меньше показателей аналогичных свойств цельной древесины при сопоставимых значениях влажности и температуры;

8. Разработано техническое решение и предложена конструкция мобильного устройства для отвода избыточной тепловой энергии из массива кучи в окружающую внешнюю среду. Применение устройства позволяет интенсифицировать теплообмен от 5...10 % при обычных условиях хранения технологической щепы до 80...95 %, при этом количество отведенной тепловой энергии составляет до 0,153 кВт/ч;

9. Дана оценка энергетической эффективности применения термосифонных теплоотводящих устройств для отвода избыточной тепловой энергии из массива кучи технологической щепы в окружающую среду, доказано, что теплоотвод рассматриваемым способом не требует потребления коммерческой энергии, исключает отвод влаги из массива и предотвращает самовозгорание измельченной древесины, обеспечивая температурный режим в массиве кучи от 18 до 60°C;

10. Мобильное теплоотводящее устройство внедрено на открытых складах технологической щепы ОАО «Лесозавод-2», ОАО «Северное лесопромышленное товарищество Лесозавод-№3», ЗАО «Лесозавод-25», ОАО «Соломбальский лесопильно-деревообрабатывающий комбинат», ООО «Даммерс», что подтверждено копиями документов;

11. Разработана производственная инструкция по безопасному хранению технологической щепы на открытых складах с применением мобильного теплоотводящего устройства.

**Основное содержание диссертации опубликовано:**

*в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Деснёв А.Н., Алексеева Л.В. «К оценке ресурсов древесных отходов лесопиления» // Лесной журнал №6. / Архангельск: 2009. с. 141-144.

2. Деснёв А.Н., Алексеева Л.В. «Образование и оценка объемов отходов в лесопилении» // Лесной вестник №4(73). / Москва 2010. с. 51-55.

3. Деснёв А.Н., Мелехов В.И., Данилов В.Е., Тюрикова Т.В. «Динамика изменения теплофизических характеристик измельчённых древесных материалов при кучевом хранении» // Лесотехнический журнал №4. / Воронеж: 2019. с. 176-181.

*в базе Web of Science:*

4. Деснёв А.Н., Прокофьев Г.Ф., Тюриков В.Ю. «Моделирование температурного поля в массиве кучи измельчённой древесины» // Лесной журнал №6. / Архангельск: 2019. с. 123-130.

*в прочих изданиях:*

5. Деснёв А.Н. «Оценка объемов сыпучих продуктов лесопиления» // Актуальные проблемы развития лесного комплекса, Материалы 6 международной научно-технической конференции: сборник научных трудов. / Вологда: 2010. с.115-118.

6. Деснёв А.Н. «Обоснование метода оценки пожарной опасности отходов лесопиления» // Актуальные проблемы развития лесного комплекса, Материалы 7 международной научно-технической конференции: сборник научных трудов. / Вологда: 2010. с. 97-99.

7. Деснёв А.Н. Братилов Д.А. «Устройство для отвода тепла из массива технологической щепы в условиях кучевого хранения» // Вестник ПГТУ № 2 (26). / Йошкар-Ола: 2015. с. 44-50.

8. Деснёв А.Н., Мелехов В.И., Братилов Д.А. «Экспериментальное исследование распределения температуры и влажности при открытом способе хранения» // Известия Тульского государственного университета, № 5, часть 2. / Тула: 2015. с. 98-103.

9. Деснёв А.Н., Бутаков С.В. «Изучение процесса возгорания древесины в сильных электрических полях» // Деревообрабатывающая промышленность №3. / Москва: 2010. - с. 26-29.

10. Деснёв А.Н., Бутаков С.В. «Оценка предельной напряжённости электрического поля в процессе возгорания древесины материалов» // Деревообрабатывающая промышленность №4. / Москва: 2010. с. 5-7.

11. Деснёв А.Н., Бутаков С.В. «Экспериментальная проверка возгорания древесины в электрическом поле» // Наука – Северному региону, выпуск № 83 сборник научных трудов. / Архангельск: 2010. с. 49-52.

12. Деснёв А.Н., Шатохин А.А. «Пожарная безопасность в электроустановках на объектах лесного комплекса» // Леса России в XXI веке, Сборник материалов четвертой международной научно-практической интернет-конференции: сборник научных трудов / Санкт-Петербург: 2010. с. 95-99.