

На правах рукописи



**Сафин Руслан Рушанович**

**ВАКУУМНАЯ СУШКА КАПИЛЛЯРНОПОРИСТЫХ  
КОЛЛОИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОНВЕКТИВНЫХ  
СПОСОБАХ ПОДВОДА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Иваново – 2007

Работа выполнена в Казанском государственном технологическом университете на кафедре переработки древесных материалов.

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| <b>Научный консультант</b>   | – доктор технических наук, профессор А.С. Торопов                                   |
| <b>Официальные оппоненты</b> | – доктор технических наук, профессор С.П. Рудобашта                                 |
|                              | – доктор технических наук, профессор В.Б. Сажин                                     |
|                              | – доктор технических наук профессор А.Г. Липин                                      |
| <b>Ведущая организация</b>   | – Волжско-Камский научно-исследовательский институт лесной промышленности (ВКНИИЛП) |

Защита состоится «18» мая 2007 г. в 14.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.063.05 в Ивановском государственном химико-технологическом университете по адресу: 153000, г. Иваново, пр. Ф.Энгельса, 7, ауд. Г-205.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного химико-технологического университета.

Автореферат разослан « 5 » апреля 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Г.А. Зуева

## Общая характеристика работы

В настоящее время многие отечественные предприятия нуждаются в кардинальных преобразованиях путем освоения современных технологий, обеспечивающих интенсификацию производства и его экономический рост.

**Актуальность темы.** В современных условиях при наблюдаемой тенденции роста тарифов на энергоносители, особенно актуальной становится проблема энергосбережения в производственно-хозяйственной деятельности предприятий.

При этом одним из самых энергоемких процессов на многих предприятиях является сушка. Особенное значение данный технологический процесс приобретает в условиях, когда необходимо сохранение определенных свойств высушиваемого материала. В частности, продолжительность сушки массивной древесины, являющейся наиболее ярким представителем капиллярнопористых коллоидных материалов, занимает от двух недель до двух месяцев в зависимости от сортамента высушиваемого пиломатериала, что обусловлено развитием внутренних сушильных напряжений, приводящих к нарушению целостности и снижению качества сушки. Подобная длительность процесса приводит к значительному потреблению тепло- и электроэнергии. Но даже при высоких издержках рассматриваемого процесса не удастся избежать низкого качества высушиваемого пиломатериала, поскольку на предприятиях зачастую работают морально и физически устаревшие конструкции сушильных камер. В то время как в рыночных условиях, становясь объектом товарно-денежных отношений, обладающим экономической самостоятельностью и полностью отвечающим за результаты своей хозяйственной деятельности, предприятие должно особое внимание уделить сокращению производственного цикла и повышению качества конечного продукта, что обеспечит его высокую конкурентоспособность и устойчивость положения на рынке.

Значительно сократить продолжительность процесса, а значит, и снизить её себестоимость позволяют вакуумные технологии сушки материалов. Кроме того, возможность ведения процесса при более низких температурах позволяет исключить снижение качественных характеристик капиллярнопористых коллоидных тел, что особенно важно при сушке пиломатериалов из древесины ценных трудносохнущих лиственных пород или термолабильных материалов.

Однако при сушке в вакууме возникает проблема подвода тепловой энергии к высушиваемому материалу. Такие известные методы подвода теплоты, как контактное, диэлектрическое нагревание или нагрев в СВЧ-поле не всегда позволяют получить требуемое качество или приводят к значительному удорожанию стоимости сушильного процесса. Поэтому наиболее перспективным направлением, как с позиций себестоимости процесса, так и с позиций качества получаемой продукции, считаются вакуумные технологии сушки с подводом тепла конвекцией, которые можно осуществлять путем чередования стадий нагрева и вакуумирования (осциллирующие технологии) или конвективной сушкой в разреженной среде. При этом в качестве теплоносителя могут быть использованы влажный горячий воздух, перегретый пар или

гидрофобные жидкости.

Однако данные технологии до сих пор не имеют расчетной базы, позволяющей получить оптимальные режимные параметры процесса. Кроме того, нет четких рекомендаций по выбору той или иной технологии вакуумной сушки применительно к различным сортаментам капиллярнопористых коллоидных материалов.

Поэтому разработка методов расчета технологических процессов вакуумной сушки капиллярнопористых коллоидных материалов при конвективных методах подвода тепла, совершенствование действующих и создание новых высокоэффективных ресурсо- и энергосберегающих технологий и их аппаратурного оформления является актуальной задачей, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Работа выполнялась в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 24 января 1998 г. № 80 «О федеральной целевой программе «Энергосбережение России на 1998 – 2005 годы»; координационным планом НИР АН РФ по направлению «Теоретические основы химической технологии» по проблеме 2.27.2.8.1 «Сушка материалов понижением давления»; координационным планом НИР ВУЗов по процессам и аппаратам химических производств и кибернетике химико-технологических процессов.

**Цель работы** состоит в разработке метода расчета и аппаратурного оформления процессов вакуумной сушки капиллярнопористых коллоидных материалов при конвективных способах подвода тепловой энергии на примере удаления влаги из древесины.

В соответствии с поставленной целью в настоящей работе решались следующие задачи:

- разработка единой математической модели для процессов вакуумной сушки листовых капиллярнопористых коллоидных материалов при конвективных способах подвода тепла;
- разработка алгоритма расчета и моделирование процессов, с целью разработки новых способов вакуумной сушки древесины и выявления рациональных режимов удаления влаги в зависимости от сортамента высушиваемой древесины;
- разработка алгоритма подбора наиболее рациональной технологии сушки в зависимости от целей предприятия и объекта сушки;
- разработка экспериментальных установок для физического моделирования рассматриваемых процессов, а также для исследования свойств капиллярнопористых коллоидных материалов;
- разработка аппаратурного оформления технологических процессов вакуумной сушки древесины при конвективных методах теплоподвода;
- разработка методов совмещенной сушки и пропитки древесины;
- промышленная реализация результатов теоретических и экспериментальных исследований и конструкторских разработок;
- реализация результатов исследований в смежных областях промышленности.

**Научная новизна.** Впервые исследованы и обобщены закономерности методов вакуумной сушки капиллярнопористых коллоидных материалов при конвективных

способах подвода теплоты:

- создано обобщенное математическое описание технологических процессов, протекающих при вакуумной сушке листовых капиллярнопористых коллоидных материалов;

- по результатам математического моделирования и экспериментальных исследований выявлены пути интенсификации процессов и повышения качества высушиваемого пиломатериала: выявлена целесообразность проведения процессов по комбинированной схеме с подводом тепловой энергии от различных теплоносителей, получены рациональные режимные параметры в зависимости от начальной и текущей влажности, породы и толщины пиломатериала, показана целесообразность регулирования процесса по дифференциальной усадке высушиваемой древесины;

- разработаны и реализованы новые способы вакуумно-конвективной сушки путем осциллирования в среде перегретого пара и конвективной сушки в среде разреженного горячего воздуха, новизна которых подтверждена патентами;

- выявлены кинетические закономерности процессов вакуумной сушки древесины с подводом тепловой энергии конвекцией;

- выявлены области рационального использования различных методов сушки капиллярнопористых коллоидных материалов, разработаны рекомендации по выбору наиболее рациональной технологии сушки в зависимости от целей предприятия и сортамента древесины;

- получены зависимости коэффициента молярного переноса наиболее распространенных пород древесины в зависимости от влажности и температуры образца.

**Практическая ценность.** В результате комплексного исследования технологических процессов вакуумной сушки капиллярнопористых коллоидных материалов:

- разработаны новые конструкции сушильного оборудования, а также конструктивные рекомендации, направленные на улучшение качества высушиваемого материала, новизна конструкций подтверждена патентами.

- разработаны рациональные технологические режимы ведения вакуумно-конвективной сушки пиломатериалов наиболее распространенных отечественных пород древесины;

- разработаны рекомендации по выбору наиболее рациональной технологии сушки в зависимости от целей предприятия и сортамента высушиваемой древесины;

- разработаны и реализованы рекомендации по усовершенствованию существующих конвективных камер для сушки пиломатериалов;

- разработаны экспериментальные установки и методики исследований, позволяющие определить недостающие для моделирования характеристики.

**Реализация работы.** Результаты проведенных в работе исследований реализованы при создании конструкторских решений, методик расчета, конструкторской документации, паспортов и инструкций по эксплуатации.

Внедрение вакуумных аппаратов для сушки массивной древесины на предприятиях «Елховлес», «Искра», «Синтез-Сандра», «Новый век» и «Муромский приборостроительный завод» осуществлено с общим экономическим эффектом свыше 1,5

млн. руб.

Промышленное внедрение вакуумной камеры для сушки перги, использующейся при производстве лекарственного средства, на предприятии «Корт» осуществлено с экономическим эффектом более 1 млн. руб. в год.

Деревообрабатывающим предприятиям «Карпентер» и «Вельд» передана конструкторская документация по усовершенствованию конвективных камер периодического действия с целью снижения продолжительности и повышения качества сушки. Экономический эффект от внедрения данных технических решений составил более 1,6 млн. руб.

Ряду предприятий представлена документация на разработанную конструкцию установки для проведения экспресс-досушки с целью определения влажности капиллярно-пористого коллоидного материала весовым методом.

Разработанные экспериментальные установки, методики исследований и программные продукты внедрены в учебный процесс в рамках курсов «Гидротермическая обработка и консервирование древесины» и «Методы математического моделирования процессов в деревообработке».

**Основные положения, выносимые на защиту.** Решение проблемы, состоящей в создании ресурсо- и энергосберегающих технологий и аппаратурного оформления процессов вакуумной сушки древесины с конвективными способами подвода тепла к материалу, на основе режимных параметров и конструктивных характеристик, полученных в результате расчета обобщенного математического описания, а именно:

- обобщенное математическое описание технологических процессов, протекающих при вакуумной сушке капиллярно-пористых коллоидных материалов с конвективными способами подвода тепла;
- результаты математического моделирования и экспериментальных исследований вышеуказанных процессов;
- способы и конструкции установок вакуумной сушки с подводом тепла от газообразного теплоносителя;
- способы и конструкции установок совмещенной сушки-пропитки в гидростатических жидкостях;
- способ и конструкция установки для проведения экспресс-досушки с целью определения влажности капиллярнопористых коллоидных весовым методом;
- способы и конструктивные особенности установок для вакуумно-кондуктивной сушки материалов капиллярнопористого и коллоидного типа;
- усовершенствованные схемы конвективных камер периодического действия для сушки пиломатериалов;
- результаты исследования эффективности выполненных разработок.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на:

- на V Минском международном форуме (Минск, 2004);
- на Международных симпозиумах «Строение, свойства и качество древесины» (С.-Петербург, 2000, 2004); «Ресурсоэффективность и энергосбережение» (Казань,

2004);

- на Международных конференциях «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы)» (Москва, 2002, 2006); «Лес-2000, 2004» (Брянск, 2000, 2004); «Производство, наука и образование» (Казань, 1998); «Методы кибернетики химико-технологических процессов» (Казань, 1999); «ММТТ-2000, 2006»; «Химико-лесной комплекс. Проблемы и решения» (Красноярск, 2000); «Энергоресурсосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные производства» (Иваново, 2004); «Научный потенциал мира» (Днепропетровск, 2004); «Технологии, машины и производство лесного комплекса будущего» (Воронеж, 2004);

- на Всероссийских конференциях «Химия и технология растительных веществ» (Сыктывкар, 2000); «Лесной и химический комплексы: проблемы и решения» (Красноярск, 2003, 2004); «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» (Вологда, 2004); «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (Казань, 2005); «Инновационные процессы в высшей школе» (Краснодар, 2004);

- на национальной конференции по теплоэнергетике «НКТЭ-2006» (Казань, 2006);

- на научно-практических конференциях «Вакуумная техника и технология» (Казань, 2003, 2004); «Проблемы использования и воспроизводства лесных ресурсов» (Казань, 2006); «Технология и оборудование деревообработки в XXI веке» (Воронеж, 2005);

- на научных сессиях по технологическим процессам Казанского государственного технологического университета (Казань, 2000-07).

Результаты работы экспонировались на V Международном салоне инноваций и инвестиций в Москве (2005), Международной выставке научно-технических достижений в Китае (2006) и региональных выставках в Самаре (2006) и Казани (2006). Установка вакуум-осциллирующей сушки древесины удостоена серебряных медалей на V Международном салоне инноваций и инвестиций в Москве и Международной выставке научно-технических достижений в Китае. Установка для пирогенетической переработки древесных отходов награждена бронзовой медалью V Международного салона инноваций и инвестиций.

Основные положения диссертации были защищены в рамках четырех кандидатских диссертаций, выполненных под оруководством автора.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований автором опубликовано 104 печатные работы, в том числе одна монография, 12 статей в ведущих рецензируемых журналах и 11 патентов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 414 страниц машинописного текста, в том числе 322 страницы основного текста. Работа содержит 126 рисунков и 13 таблиц.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определена цель исследований, отмечена научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** изложен методологический подход к исследованию технологических процессов, протекающих при вакуумной сушке при конвективных способах подвода тепловой энергии к материалу: путем чередования стадий нагрева и вакуумирования (осциллирующие технологии) или конвективной сушкой в разреженной среде. Возможность проведения исследований данных процессов по единой методике связана с общностью дифференциальных уравнений переноса потенциала, структуры движущей силы и идентичностью выражений для межфазных потоков переноса. При этом движущей силой является разность парциальных давлений паров удаляемой жидкости над поверхностью влажного материала и в парогазовой фазе.

Процесс вакуумной сушки капиллярнопористых коллоидных материалов представлен как сложная взаимодействующая система с последующим качественным анализом ее структуры, разработкой математического описания и оценкой неизвестных параметров.

Процесс сушки капиллярнопористого коллоидного материала состоит из перемещения влаги внутри материала, парообразования и перемещения влаги с поверхности тепломассообмена в окружающую среду. Вследствие этого к нижнему уровню иерархии процесса сушки следует отнести явления, связанные с переносом вещества и энергии внутри частицы. Второму уровню иерархии соответствуют процессы фазового перехода от жидкости к паровому и парогазовому потоку. Третий уровень иерархии определяется переносом вещества и энергии через пограничный слой, возникающий у поверхности частицы. Четвертый уровень иерархической структуры характеризует общую гидродинамическую структуру потока в сушильной камере, где определенную роль играют условия равномерности ввода сушильного агента в камеру и в штабель, а также наличие закручивания потока в пространстве над листовым материалом.

Представлен развернутый план исследований с выделением основных этапов и направлений в решении задач. На первых этапах проводится анализ существующих технологических процессов, протекающих при пониженном давлении, и качественное изучение совокупности эффектов и явлений, характерных для рассматриваемых технологий, а именно: тепломассообменные процессы, протекающие при пониженном давлении среды и при конвекции, а также взаимосвязь оборудования с основным технологическим процессом. На последующих этапах осуществляется формализация свойств материала как объекта исследуемой технологии и явлений соответствующих уровней иерархии, математическое моделирование процессов, проверка их адекватности и при необходимости подстройка моделей к реальным процессам. На завершающем этапе, основанном на результатах математического моделирования, выявляются совершенные технологические режимы, способы проведения процессов и конструкции аппаратов для их реализации.

Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о том, что для описания процессов, протекающих при пониженном давлении среды, может быть использована общая система нелинейных дифференциальных уравнений, характеризующаяся дополнительными условиями для рассматриваемых физических ситуаций, а также различной формулировкой начальных и граничных условий. Общая теория переноса энергии и вещества служит теоретической основой аналитических и экспериментальных исследований данных процессов.

Анализ экспериментальных данных и опыта практического использования вакуумных технологий выявил общие закономерности переноса потенциала, на основе которых обоснованы допущения, упрощающие методику исследования, и определены подходы к разработке обобщенной математической модели. В связи с этим основной объем теоретических и экспериментальных разработок определен необходимостью исследования кинетических закономерностей процессов на уровнях переноса потенциала в пиломатериале и взаимодействия совокупности аппаратов.

**Во второй главе** проведена формализация свойств одного из наиболее распространенных видов капиллярнопористых коллоидных материалов с целью возможности дальнейшего решения поставленной задачи методами математического моделирования. Свойства капиллярнопористых коллоидных материалов рассмотрены на примере древесины, поскольку она имеет капиллярнопористое строение, а стенки капилляров древесины обладают свойствами эластичных ограниченно набухающих гелей.

Анализ литературных данных позволяет сделать вывод о том, что древесина достаточно хорошо изучена как объект сушки. В справочной литературе довольно подробно рассмотрены структурно-сорбционные и массопроводные характеристики древесины: имеются эмпирические зависимости теплофизических, влажностных и термодинамических характеристик, представленные в графической форме. Широко исследован механизм переноса влаги в древесине в процессе сушки. В литературе содержатся сведения о реологических свойствах древесины основных пород, освещается механизм образования внутренних напряжений, а также излагаются экспериментально-теоретические методы анализа напряженного состояния древесины во время и после сушки.

**В третьей главе** рассмотрена физическая картина и разработана обобщенная математическая модель процессов вакуумной сушки листовых материалов с конвективными способами подвода тепла.

Схемы ведения исследуемых процессов представлены на рис. 1. При проведении стадии прогрева в среде перегретого пара процесс сушки начинается с откачки инертного газа из рабочей полости аппарата, что приводит к отсутствию фазового сопротивления и способствует, тем самым, более интенсивному прогреву материала. При осциллирующих технологиях вакуумной сушки происходит чередование стадий прогрева материала и вакуумирования. В процессе конвективной сушки в среде разреженного теплоносителя после стадии прогрева, протекающей при атмосферном давлении, начинается сушка при пониженном давлении среды.

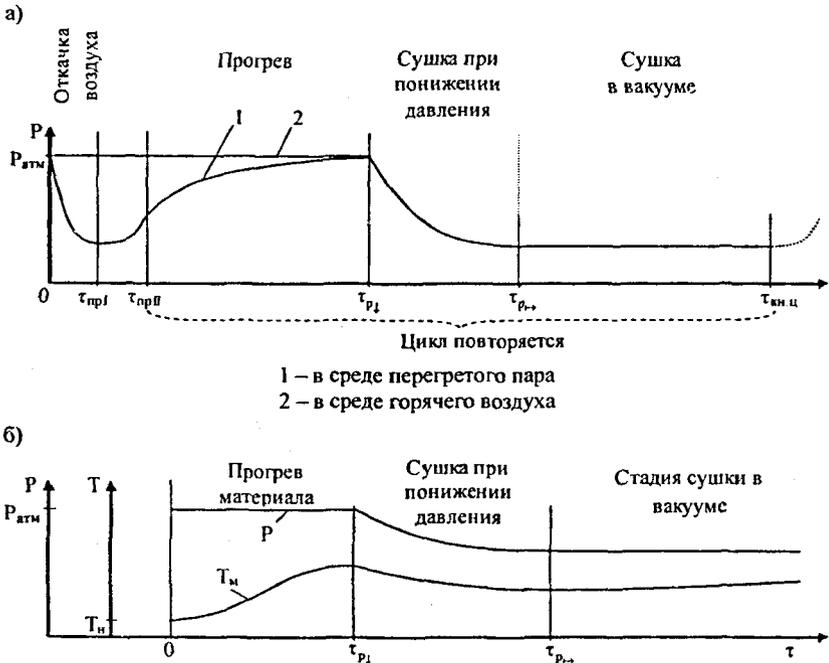


Рис. 1. Схемы ведения вакуумной сушки материалов при конвективных способах подвода тепла:  
а – осциллирующие технологии;  
б – конвективная сушка в разреженной среде.

Согласно блочному принципу построения математической модели процесса, совокупность физических явлений, составляющих исследуемый способ сушки, рассматривается решая внешнюю – тепломассообмен в среде теплоносителя и его тепломассообмен с материалом, и внутреннюю задачи – тепломассообмен внутри материала.

При решении внешней задачи вначале исследуют гидродинамическую обстановку в аппарате, а затем переходят к изучению кинетики массо- и теплопередачи с учетом выявленных гидродинамических условий модели. Для выявленной структуры потоков в процессах вакуумной сушки при конвективных методах теплоподвода (рис. 2), основными характеристиками являются разность парциальных давлений паров удаляемой влаги над поверхностью влажного материала и в окружающей среде и интенсивность подвода тепла конвекцией.

Для решения задачи тепломассообмена внутри плоского материала использованы дифференциальные уравнения Лыкова, которые применительно к одномерной симметричной пластине записаны в виде выражений

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + a_m \delta \left( \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} \right) + \frac{k_p}{\rho_0} \left( \frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial \tau} = a_\tau \left( \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} \right) + \frac{r\varepsilon}{c_m} \left( \frac{\partial U}{\partial \tau} \right). \quad (2)$$

Поле общего давления внутри материала зависит от свойств капиллярнопористого коллоидного тела. В частности, для пиломатериалов из древесины может быть использовано уравнение, полученное Г.С. Шубиным

$$\frac{\partial p_m}{\partial \tau} = \frac{RT_m}{C_{0\mu}} \left[ k_p \frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} + \varepsilon \cdot \rho_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} \right] + \frac{p_m}{T_m} \left( \frac{\partial T_m}{\partial \tau} \right). \quad (3)$$

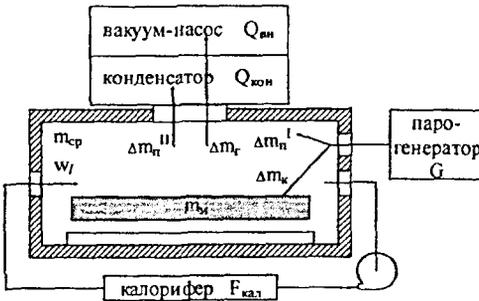


Рис. 2. Структурная схема вакуумной сушки пиломатериалов при конвективных способах подвода тепла.

При решении задач переноса влаги внутри материала учитывались результаты других исследователей, в частности П.С. Сергеевского, согласно которым в древесине перенос влаги за счет градиента влажности в зоне свободной влаги практически отсутствует и при решении задач по сушке им можно пренебречь. В тоже время молярный перенос влаги незначителен в зоне гигроскопической влажности.

Тепломассообмен в процессе конвективного обтекания листового материала газообразным теплоносителем. Для решения совмещенной задачи удаления влаги из материала при его конвективном обтекании горячим воздухом или перегретым паром температурное поле окружающей среды определялось с помощью дифференциального уравнения переноса энергии, которое с учетом теплообмена с материалом, представлено в виде выражения

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_\tau \frac{\partial T}{\partial \ell} = \frac{[\alpha \cdot (T_{cp} - T_{m.пов}) - \gamma \cdot j_{пов}] \cdot F_m^*}{c_{\mu,см} \rho_{см}}. \quad (4)$$

Граничное условие для решения данного уравнения представляет собой зависимость изменения температуры фронта среды при прохождении через calorifier и определяется выражением

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \tau} \right|_{\ell=0} = \frac{K \cdot \Delta t \cdot F_{кал} \cdot \mu_{см}}{\rho_{см} \cdot V \cdot c_{\mu,см}}. \quad (5)$$

Граничные условия для решения уравнений (1), (2) и (3) записаны в виде

$$j_{пов} - \beta \cdot (\rho_{рав} - \rho_n) = 0, \quad (6)$$

$$\alpha \cdot (T - T_{\text{м.пов}}) - r \cdot j_{\text{пов}} = -\lambda_{\text{м}} \left. \frac{\partial T_{\text{м}}}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (7)$$

$$\rho_{\text{м}}(\tau, 0) = P, \quad (8)$$

где изменение плотности паров среды при прохождении над  $i$ -отрезком поверхности материала определяется из выражения

$$\frac{d\rho_{\text{п}}}{d\ell} = \frac{j_{\text{пов } i} \cdot F_{\text{м}}^*}{w_{\ell}}. \quad (9)$$

При решении задачи конвективного прогрева материала при осциллирующих тепловых вакуумной сушки внутренняя задача тепломассопереноса сводится к определению температурного и влажностного полей; молярным переносом в этом случае можно пренебречь.

Тепломассоперенос в процессе прогрева материалов при наличии фазовых переходов теплоносителя. При проведении процесса сушки капиллярнопористых коллоидных материалов в среде перегретого пара после удаления инертного газа из рабочей полости аппарата в камеру подают водяной пар. При этом происходит конденсация пара на холодной поверхности пиломатериала в виде тонкой пленки жидкости и выделение теплоты фазового перехода, т.е. прогрев материала протекает при фазовых переходах теплоносителя. Кроме того, пар, поступающий в камеру сушки, идет на создание паровой среды, повышая давление в аппарате (рис. 2). Вследствие этого материальный баланс по пару можно представить в следующем виде

$$dm_{\text{в}} = dm_{\text{п}} + dm_{\text{к}}. \quad (10)$$

Количество пара, поступившего в аппарат из парогенератора, определяем дифференцированием уравнения Сен-Венана-Венцеля

$$dm_{\text{в}} = \mu' \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2k'}{k'+1}} \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot \left[ \left( \frac{P}{P_{\text{пр}}} \right)^{\frac{2}{k'}} - \left( \frac{P}{P_{\text{пр}}} \right)^{\frac{k'+1}{k'}} \right] d\tau +$$

$$+ \frac{\mu' \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \tau \cdot \sqrt{\rho_{\text{пр}} \cdot P_{\text{пр}}}}{\sqrt{32k'(k'+1)}} \cdot \left[ 2 \left( \frac{P}{P_{\text{пр}}} \right)^{\frac{2}{k'}} - (k'+1) \left( \frac{P}{P_{\text{пр}}} \right)^{\frac{k'+1}{k'}} \right] \frac{dP}{P} \quad (11)$$

Количество пара, ушедшее на создание паровой среды определяем совместным решением дифференцированных уравнений Ангуана и Менделеева-Клапейрона

$$dm_{\text{п}} = \left[ \frac{B \cdot \mu \cdot V_{\text{св}}}{R \cdot T^2} \exp\left(A - \frac{B}{T}\right) dT - m_{\text{п}} \cdot dT \right] \cdot \frac{1}{T}. \quad (12)$$

Температура среды при конденсации определяется из равенства потоков теплоты при фазовом переходе и конвективном теплообмене

$$\Gamma \cdot j_k - \alpha_k (T - T_{\text{м.пов}}) = 0, \quad (13)$$

или

$$T = \frac{\Gamma \cdot j_k + \alpha_k \cdot T_{\text{м.пов}}}{\alpha_k}, \quad (14)$$

Граничные условия для системы уравнений (1), (2) могут быть представлены в следующем виде

$$\alpha_k (T - T_{\text{м.пов}}) = -\lambda_m \left. \frac{\partial T_m}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (15)$$

$$U_{\text{пов}} = \frac{(\rho_{\text{д.в}} - \rho_{\text{б}}) \cdot \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{д.в}} \cdot \rho_{\text{б}}}, \quad (16)$$

где влагосодержание поверхности определяется из условия максимального заполнения капилляров влагой, применительно к древесным пиломатериалам может быть использовано выражение для максимальной влажности данной породы древесины.

Тепломассоперенос в процессе совмещенной сушки-пропитки пиломатериалов в гидрофобных жидкостях. Дифференциальное уравнение переноса энергии при рассмотрении одномерной задачи с учетом естественной конвекции и функции стока тепла к материалу принимает вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda_{\text{ж}} \cdot \mu_{\text{ж}}}{\epsilon_{\mu, \text{ж}} \rho_{\text{ж}}} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\alpha \cdot (T - T_{\text{м.пов}}) \cdot F_m^*}{\epsilon_{\mu, \text{ж}} \rho_{\text{ж}}}. \quad (17)$$

Уравнение скорости естественной конвекции в зависимости от разности температур можно представить выражением

$$w_z = \sqrt{g \cdot \left( \frac{1 + \beta'(\bar{T} - 293)}{1 + \beta'(T_{\text{нагр.ж}} - 293)} - 1 \right) \cdot z}. \quad (18)$$

Граничные условия для решения уравнений (2) и (3) аналогичны выражениям (7), (8); граничное условие для решения уравнения (1) представлено выражением равновесной влажности древесины при сушке в гидрофобных жидкостях, полученным по соответствующим графическим зависимостям

$$U_p = -14,69 + 16795,18 \frac{1}{T} + 7,47 \frac{1}{P} - 6,43 \cdot 10^6 \frac{1}{T^2} - 0,26P^2 - 5998,64 \frac{P}{T} + 8,25 \cdot 10^8 \frac{1}{T^3} + 0,009P^3 + 91,44 \frac{P^2}{T} + 1,21 \cdot 10^6 \frac{P}{T^2} \quad (19)$$

Процесс пропитки древесины гидрофобной жидкостью рассматривается как движение смачивающей жидкости в капилляре с защемленным газом. При этом основное влияние на продвижение жидкости в капилляре оказывают процессы растворения и диффузии находящиеся в капилляре водяных паров в пропитывающую жидкость. Пропитка начинается в тот момент, когда поток влаги, удаляющейся из древесины, становится меньше взаимобратного потока пропитывающей жидкости

$$j_{ж} = p_{ж} \cdot \frac{\alpha^* \cdot k \cdot R \cdot T_m \sqrt{D}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau}}, \quad (20)$$

где

$$\alpha^* = \frac{2\sigma_{ж} \cdot \cos\theta}{\Gamma_{кап} \cdot P + 2\sigma_{ж} \cdot \cos\theta}. \quad (21)$$

**Тепломассоперенос в парогазовой фазе при понижении давления среды.** Математическое описание процесса переноса тепла и массы в парогазовой фазе основано на уравнениях материального и теплового балансов. Для нестационарных условий протекания процесса разница между притоком и отводом составит накопление массы и энергии в свободном объеме аппарата

$$V_{св} dp_n = dm_n - dm_{с.п}, \quad (22)$$

$$V_{св} dp_r = -dm_{с.г}, \quad (23)$$

$$\rho_{с.м} c_{с.м} V_{св} dT = \alpha(T_{м.пов} - T)F_m d\tau - Q_{с.пр} \rho_{с.м} c_{с.м} T d\tau + c_{п.г} F_m j_{пов} T_{пов} d\tau + K\Delta t F_{кал} d\tau. \quad (24)$$

Левая часть уравнения (22) характеризует скорость изменения массы пара в парогазовой фазе в единице свободного объема аппарата; первое слагаемое правой части – скорость подвода массы пара в парогазовую фазу, а второе слагаемое – скорость его отвода в вакуумную линию. Соотношение (23) отличается от (22) отсутствием слагаемого, характеризующего подвод массы воздуха в единицу свободного объема вследствие герметичности аппарата. В уравнении переноса энергии (24) левая часть представляет собой изменение теплосодержания парогазовой фазы; первый член правой части уравнения характеризует подвод или отвод тепла за счет теплообмена с поверхностью влажного материала; второй член – отвод тепла с удаляемой в вакуумную линию парогазовой смесью; третий – приток тепла с парами влаги, удаляемыми из материала; четвертый – приток тепла из калорифера.

После некоторых преобразований выражений (22), (23) и (24) получены уравнения, определяющие скорости изменения парциальных давлений пара и газа и температуры среды

$$\frac{dp_n}{d\tau} = \frac{F \cdot R \cdot T}{V_{св} \mu_n} j_n - p_n \left( \frac{Q_{с.п}}{V_{св}} - \frac{1}{T} \frac{dT}{d\tau} \right), \quad (25)$$

$$\frac{dp_r}{d\tau} = p_r \left( \frac{1}{T} \frac{dT}{d\tau} - \frac{Q_{с.г}}{V_{св}} \right), \quad (26)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \left[ \frac{(\alpha F_m (T_{м.пов} - T) + c_{п.г} F_m j_{пов} T_{пов} + K\Delta t F_{кал}) R}{(\mu_n p_n + \mu_r p_r) c_{с.м} V_{св}} - \frac{Q_{с.пр}}{V_{св}} \right] T. \quad (27)$$

Тепломассоперенос в пиломатериале в процессе понижения давления описывается дифференциальными уравнениями (1) – (3) при начальных условиях, представляющих поля температур, влажности и давления внутри материала для момента вре-

мени  $\tau_{p_1}$  (рис.1); граничные условия представлены в виде выражений

$$U_{\text{пов}} = a \left( \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{нас}}} \right)^n, \quad (28)$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T_{\text{м}}}{\partial x} \Big|_{x=0} = j_{\text{пов}} \cdot \Gamma + T_{\text{м.пов}} \cdot c_{\text{п}} \cdot j_{\text{пов}} + \alpha \cdot (T_{\text{м.пов}} - T), \quad (29)$$

$$P_{\text{м.пов}} = P. \quad (30)$$

На основе системы уравнений (25) – (27), описывающей теплообмен в парогазовой фазе при понижении давления внешней среды системой аппаратов вакуумный насос – конденсатор, получены частные решения.

В случае ведения процесса прогрева материала в среде перегретого водяного пара, когда происходит предварительное удаление инертного газа из рабочей полости аппарата, можно считать, что процесс протекает в парах испаряемой влаги, а общее давление в камере описывается дифференциальным уравнением изменения давления, записанным в виде

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{F \cdot R \cdot T}{V_{\text{св}} \cdot \mu} \cdot j_{\text{пов}} - P \cdot \left( \frac{Q_{\text{с.п}}}{V_{\text{св}}} - \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{d\tau} \right). \quad (31)$$

В тоже время при вакуум-осциллирующей сушке материалов в среде перегретого пара на стадии вакуумирования из работы выключаются калориферы, вследствие чего выражение (27) применительно к этому случаю можно представить в следующем виде

$$\frac{dT}{d\tau} = \left[ \frac{\alpha \cdot F_{\text{м}} \cdot R \cdot (T_{\text{м.пов}} - T)}{P \cdot \mu \cdot c_{\text{п}} \cdot V_{\text{св}}} - \frac{Q_{\text{с.п}}}{V_{\text{св}}} + \frac{F_{\text{м}} \cdot R \cdot T_{\text{м.пов}} \cdot j_{\text{пов}}}{V_{\text{св}} \cdot P \cdot \mu} \right] \cdot T. \quad (32)$$

В процессе сушки капиллярнопористых коллоидных материалов, вследствие перепада влажности по толщине и, как следствие, различной усушки слоев материала, происходит развитие внутренних сушильных напряжений. Применительно к древесине с целью предотвращения трещинообразования поверхностных слоев получено выражение минимального значения влагосодержания поверхности пиломатериала, не вызывающее увеличения влажностных напряжений выше предельно допустимых значений

$$U_{\text{пов}} = \frac{1}{R^* - C^*} \left[ s \cdot \left( U_{\text{п.г}} - \frac{[\sigma^*]}{\alpha^* E} \right) - U_{\text{max}} (R^* + C^*) \right]. \quad (33)$$

Для поддержания заданного значения парциального давления пара в среде в процессах конвективного нагрева и сушки древесины осушение газообразного теплоносителя целесообразно производить путем конденсации паров внутренним конденсатором.

Для возможности управления процессами вакуумной сушки определена объемная производительность системы удаления пара при заданной интенсивности испа-

рения жидкости с тепломассообменной поверхности  $j = \phi(\tau)$

$$Q_{с.п} = \phi(\tau) \frac{F \cdot R \cdot T}{\mu_n \exp\left(A - \frac{B}{T_{м.пов}}\right)} + V_{св} \left[ \frac{1}{T} \frac{dT}{d\tau} - \frac{B}{T_{м.пов}^2} \frac{dT_{м.пов}}{d\tau} \right]. \quad (34)$$

В процессе удаления связанной влаги в режиме идеального смешения в паровой фазе, когда парциальное давление в свободном объеме аппарата зависит от температуры и влагосодержания поверхности материала, требуемая объемная производительность системы удаления пара определяется из выражения

$$Q_{с.п} = \phi(\tau) \frac{F \cdot R \cdot T}{\mu_n \exp\left(A - \frac{B}{T_{м.пов}}\right) \left(\frac{U_{пов}}{a_{\phi}}\right)^{\frac{1}{n}}} - V_{св} \left[ \frac{1}{n \cdot U_{пов}} \frac{dU_{пов}}{d\tau} - \frac{a_{\phi}}{U_{пов}} \frac{B}{T_{м.пов}^2} \frac{1}{T_{м.пов}} \frac{dT_{м.пов}}{d\tau} \right]. \quad (35)$$

Совместное рассмотрение представленных моделей позволило разработать обобщенную математическую модель процессов вакуумной сушки применительно к пиломатериалам из древесины при конвективных методах подвода тепла, блок-схема алгоритма расчета которой представлена на рис. 3. Алгоритм расчета включает восемь блоков, связанных между собой операторами управления. Расчет начинается с активации банка данных, содержащего массивы и функции теплофизических характеристик материала и среды, и ввода исходных данных, представляющих собой начальные условия процесса, структурные характеристики штабеля, параметры технологического оборудования и другие сведения, необходимые для расчета на ЭВМ.

Далее следует оператор «Выбор вида теплоносителя», в котором пользователем осуществляется конкретизация сушильного агента. В случае, когда среда представляет собой инертный газ, обладающий фазовым сопротивлением, обеспечивается переход к блоку I. При использовании в качестве теплоносителя водяного пара вычисляются параметры блока II: производится расчет системы удаления воздуха из аппарата; далее осуществляется расчет по блоку III процесса прогрева материала при конденсации водяного пара на холодной поверхности материала. После завершения расчета прогрева древесины при фазовых переходах теплоносителя производится переход к блоку I, осуществляющему расчет процесса прогрева в среде перегретого пара. Расчет прогрева древесины в жидкостях осуществляется путем перехода к блоку IV.

Завершение процесса прогрева древесины ознаменовывается повышением температуры в центре материала до заданного значения, после чего производится переход к общим для всех процессов блокам V и VI, в которых производятся расчеты системы удаления парогазовой смеси и взаимосвязанных процессов тепломассопереноса в материале и в парогазовой фазе при понижении давления среды. Понижение

давления среды вызывает снижение интегральной температуры материала, вследствие интенсивного испарения влаги с поверхности, поэтому в зависимости от выбранной технологии сушки («импульсная» или «стационарное пониженное давление») производится расчет тепломассопереноса при выдержке под вакуумом (блок VII) или процесса конвективной сушки при давлении ниже атмосферного.

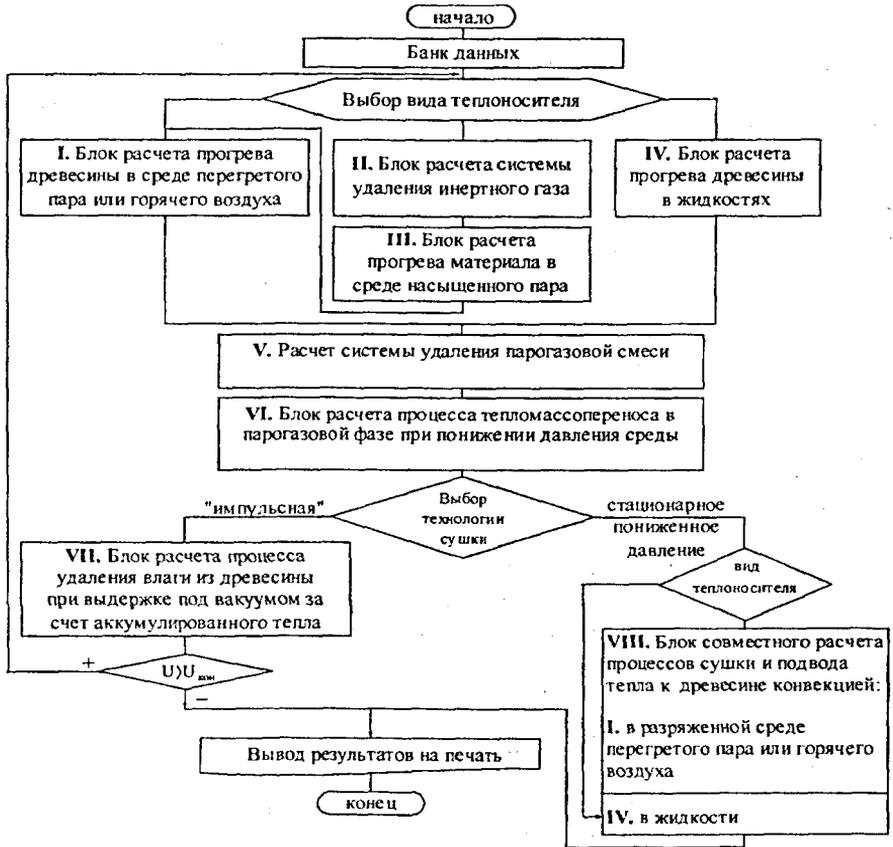


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета процессов вакуумной сушки древесины при конвективных методах подвода тепла.

В процессе «импульсной» сушки при снижении температуры в центре материала до заданного значения выдержка под вакуумом прекращается, и, в зависимости от текущего влагосодержания древесины, цикл «прогрев-вакуумирование» повторяется. При рассмотрении процесса конвективной сушки при давлении ниже атмосферного

производится расчет подвода тепла к материалу конвекцией в разреженной газовой среде или в жидкостях при совместном решении системы уравнений тепломассопереноса внутри материала. При достижении материалом заданного влагосодержания производится вывод результатов на печать.

**В четвертой главе** представлено описание экспериментальных установок и методики проведения исследований, а также изложены результаты математического и физического моделирования процессов вакуумной сушки капиллярнопористых коллоидных материалов с конвективными способами подвода тепла на примере пиломатериалов из древесины, приведены результаты экспериментальной проверки основных кинетических зависимостей, установлена адекватность разработанной модели реальному процессу.

Компьютерная программа моделирования процессов вакуумной сушки пиломатериалов с конвективным подводом тепла создана в среде Visual Basic for Application. С целью увеличения точности и повышения автоматизации расчетов в созданной программе использованы математические функции основных теплофизических, массопроводных и механических параметров древесины, полученные в результате аппроксимации диаграмм, известных из литературы.

В качестве модельных материалов для математических расчетов и экспериментальных исследований кинетики сушки были выбраны три породы древесины с учетом различных групп плотности, наибольшей распространенности в районе средней полосы России и наличия в справочной литературе наиболее полных сведений о теплофизических и физико-механических свойствах: сосна обыкновенная; береза бородавчатая; дуб каштанolistный.

В соответствии с назначением выделены три группы установок:

- установки для физического моделирования конкретных процессов (установка вакуумно-конвективной сушки пиломатериала с подводом тепла от газообразного теплоносителя, установка вакуумной сушки-пропитки пиломатериала, установка конвективной сушки древесины, установка гидротермической обработки древесины в среде насыщенного пара);

- установки для определения недостающих характеристик (установки для определения коэффициентов молярного переноса и водопроницаемости древесины, установка для определения коэффициента теплоотдачи в процессе сушки древесины);

- установки для анализа исследуемых образцов экспресс-методом (установка досушки древесины и устройство для определения дифференциальной усадки в процессе сушки обрезного пиломатериала).

Разработанные экспериментальные установки обладают новизной, многие из технических решений, положенных в основу конструкций лабораторных установок, послужили основой для разработки аппаратного оформления реальных технологических процессов и были защищены патентами РФ. Установка экспресс-досушки древесины и устройства для определения дифференциальной усадки и текущей влажности пиломатериала в процессе сушки нашли применение не только в учебных лабораториях Казанского государственного технологического университета, но и на

деревообрабатывающих предприятиях.

Адекватность разработанных математических моделей установлена обработкой результатов измерений, полученных при физическом моделировании, и результатов предсказания модели в идентичных условиях методами математической статистики. Погрешность расчета по разработанным моделям зависит от условий протекания процессов и находится в пределах 17 – 29 %.

В результате математического моделирования были получены рекомендации по режимным параметрам исследуемых процессов и конструктивным особенностям вакуумно-конвективных аппаратов сушки.

Моделирование стадии прогрева пиломатериала показало, что наиболее равномерное удаление влаги по штабелю пиломатериалов обеспечивается при поперечной схеме обтекания и установке нагревательных элементов теплового оборудования во всасывающем канале вентилятора. При этом стадию прогрева при осциллирующих технологиях сушки целесообразно вести при высоких степенях насыщенности и температуре среды, ограниченной предельной величиной градиента влажности и значением температуры, оказывающим негативное влияние на физико-механические свойства древесины.

Исследование температурных режимов выявило возможность подбора температуры среды таким образом, чтобы при соответствующей продолжительности процесса температура не оказывала влияние на физико-механические свойства древесины. Так при конвективной сушке соснового пиломатериала в разреженной среде температурой 80 °С продолжительность сушки составляет менее 40 часов, что не влияет на физико-механические свойства древесины.

Прогрев древесины за счет конденсации пара на поверхности пиломатериала целесообразен лишь при высокой начальной влажности древесины, поскольку ка-

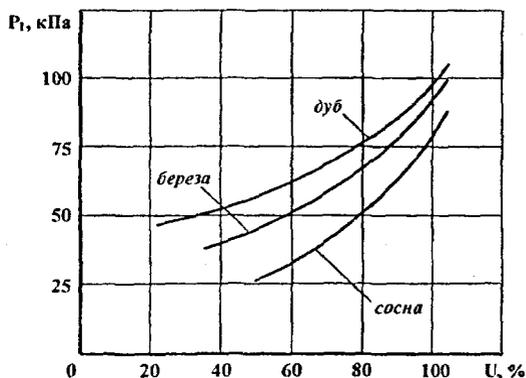


Рис. 4. Зависимость давления после первого периода вакуум-осциллирующей сушки в среде перегретого пара от величины интегрального влагосодержания пиломатериала в начале цикла «прогрев – вакуум».

пилляры практически полностью заполнены свободной влагой и дальнейшее увлажнение не приведет к значительному повышению влагосодержания, но позволит существенно сократить время стадии прогрева (рис. 4). При дальнейшем процессе сушки, когда интегральное влагосодержание материала падает, на первый план выходит прогрев в среде перегретого пара, а прогрев за счет конденсации должен быть непродолжительным и проводиться

лишь с целью частичного выравнивания влажности по толщине материала и создания в камере сушки теплоносителя. В результате применительно к процессу сушки дубовых пиломатериалов была предложена комбинированная технология: в начальный период сушки, когда влажность материала выше предела гигроскопичности, удаление влаги происходит вакуум-осциллирующим способом с прогревом древесины в среде перегретого пара; при снижении влажности ниже 25 %, когда существенных перепадов влажности по толщине не наблюдается и начинается снижение растягивающих поверхностных напряжений, происходит переход на вакуумно-конвективную сушку с прогревом в среде горячего воздуха.

Моделирование стадии вакуумирования показало, что величина влагосъема в первом периоде сушки зависит от остаточного давления в камере, в то время как во втором периоде скорость удаления влаги определяется процессами внутреннего теплопереноса. Поэтому, с целью предотвращения разрушения материала или его деформации, скорость понижения давления над поверхностью материала должна быть соразмерна со скоростью релаксации давления в зоне испарения. Продолжительность стадии вакуумирования должна лимитироваться определенной величиной градиента температуры по толщине образца, до которой выдерживается материал при пониженном давлении. Так, наиболее рациональным остаточным градиентом

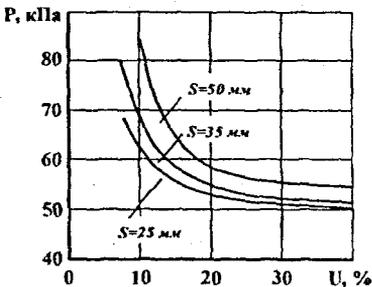


Рис. 5. Изменение давления в процессе конвективной сушки сосновых пиломатериалов в разреженной среде.

температуры после стадии вакуумирования при сушке березового пиломатериала толщиной 40 мм является 1,2 – 1,3 К/мм.

Применительно к процессам конвективной сушки в среде разреженного теплоносителя давление в аппарате в процессе удаления свободной влаги целесообразно поддерживать на определенном постоянном значении, а при снижении влагосодержания древесины ниже 25% производить постепенное повышение давления в зависимости от породы, текущей влажности и толщины сортамента (рис.5).

В результате математического моделирования и экспериментальных исследований была апробирована возможность регулирования процессов вакуумной сушки пиломатериалов с подводом тепла от газообразного теплоносителя по дифференциальной усадке (рис. 6). Выявлено снижение перепада влажности по толщине и, как следствие, уменьшение диффуздки при сушке осциллирующими режимами по сравнению с конвективной сушкой в среде разреженного теплоносителя. Экспериментальные исследования дифференциальной усадки в процессе вакуумно-конвективной сушки указали на возможность регулирования процессом по данному параметру: переход на более жесткие ступени режима возможен после прохождения максимума диффуздки, а также при переходе в отрицательную зону.

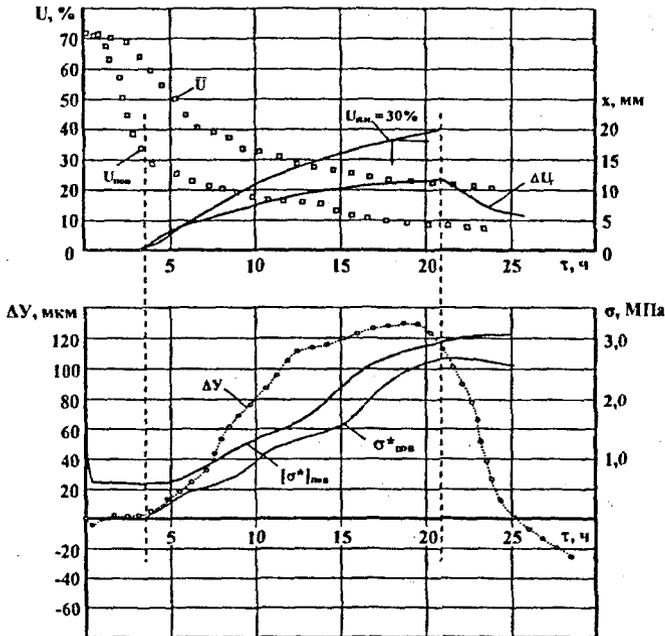


Рис. 6. Исследование возможности регулирования процесса конвективной сушки березового образца в среде разреженного теплоносителя по дифференциальной усадке.

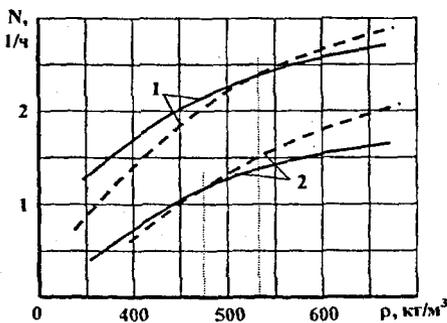


Рис. 7. Кривые скорости сушки пиломатериалов в зависимости от базисной плотности древесины: 1 — при толщине  $s = 35$  мм; 2 — при толщине  $s = 60$  мм; - - - - осциллирующие технологии; — — — — конвективная сушка в разреженной среде.

Сопоставительный анализ вакуумных технологий показал целесообразность использования того или иного способа вакуумной сушки пиломатериалов с подводом тепла от газообразного теплоносителя в зависимости от базисной плотности высушиваемой древесины и толщины сортимента (рис. 7). Для пиломатериалов небольшой толщины конвективная сушка в среде разреженного теплоносителя является менее продолжительной по сравнению с осциллирующими технологиями при

базисной плотности древесины менее  $530 \text{ кг/м}^3$ . При более высоких плотностях высушиваемой древесины более предпочтительной является вакуум-осциллирующая сушка. Для более толстых пиломатериалов подобная переходная точка составляет порядка  $450 \text{ кг/м}^3$ .

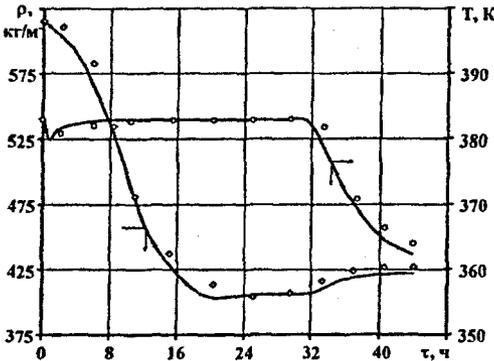


Рис. 8. Кинетические кривые температуры и плотности в процессе совмещенной сушки-пропитки березы в расплавленном парафине.

При удалении связанной влаги, когда интенсивного молярного переноса не наблюдается, интенсивность пропитки древесины растет.

В результате проведенных исследований были получены диаграммы продолжительности сушки пиломатериалов вакуумно-конвективными технологиями до требуемой конечной влажности (рис. 9) и диаграмма продолжительности предварительной подсушки перед пропиткой в гидрофобных жидкостях.

**В пятой главе** приводится описание конструкций аппаратов и технологических регламентов для реализации процессов вакуумной сушки древесины с конвективными методами подвода тепла, разработанных в соответствии с рекомендациями по их аппаратурному оформлению, полученными в результате математического моделирования. Представлены результаты промышленного внедрения новых вакуумных аппаратов для сушки древесины и усовершенствование существующих промышленных сушилок.

На основе данных, полученных теоретическими и расчетно-экспериментальными исследованиями, спроектированы и внедрены в промышленную эксплуатацию образцы вакуумных сушильных камер ВОСК-1 и ВОСК-2 с продольной и поперечной схемами циркуляции теплоносителя. В результате проведенных промышленных испытаний были получены значения энергопотребления вакуумных камер ВОСК-1 и ВОСК-2 при сушке березовых, сосновых и дубовых пиломатериалов в зависимости от начальной влажности древесины. Установлено, что среднее энергопотребление за одни сутки работы вакуумной камеры снижается с увеличением базисной плотности высушиваемого пиломатериала, что объясняется увеличением продолжительности

Исследования совмещенной сушки-пропитки древесины указали на возможность регулирования процессом по изменению плотности обрабатываемой древесины (рис.8). Было определено, что процесс пропитки древесины при высоких температурах агента сушки начинается при более низкой средней влажности материала, что объясняется большим фильтрационным переносом свободной влаги древесины, препятствующим проникновению гидрофобной жидкости.

стадии выдержки пиломатериалов более плотных пород. Суммарный эффект от внедрения данных установок на деревообрабатывающих участках предприятий «Елховлес», «Искра», «Синтез-Сандра», «Новый век» и «Муромский приборостроительный завод» составил более 1,5 млн. руб.

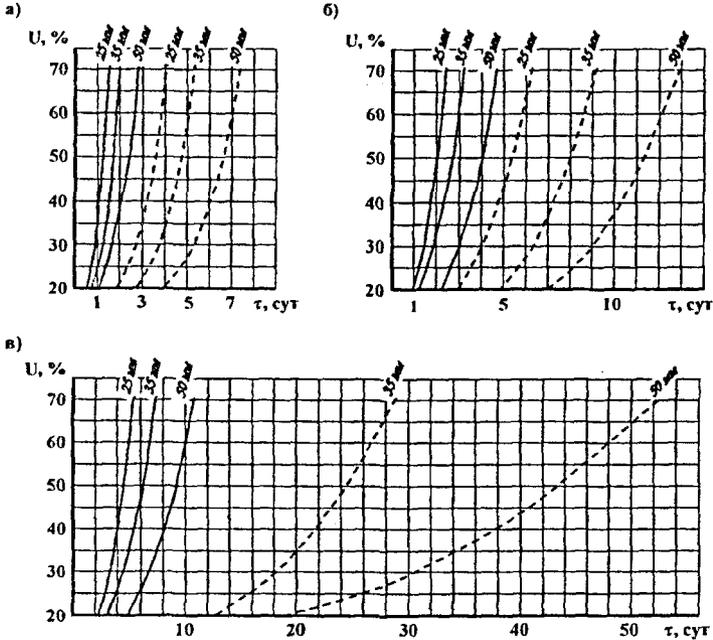


Рис. 9. Диаграммы сушки пиломатериалов:

а – сосна; б – береза; в – дуб;

— — вакуумно-конвективные технологии;

- - - традиционная конвективная сушка.

Для неавтоматизированного управления процессами вакуумно-конвективной сушки сосновых, березовых и дубовых пиломатериалов в камерах подобного типа разработаны технологические регламенты в зависимости от толщины и различной влажности древесины.

В результате проведенного технико-экономического анализа была выявлена актуальность создания новых вакуумных аппаратов с большим объемом разовой загрузки. Одним из путей решения поставленной задачи стала разработка вакуумной сушильной камеры железобетонной конструкции, которая предназначена для реализации методов конвективной сушки мягких пород древесины в среде разреженного теплоносителя.

Для сушки твердых пород древесины, для которых предпочтительными явля-

ются осциллирующие режимы, на базе установок ВОСК-1 и ВОСК-2 разработана конструкция сушилки ВОСК-тандем, особенностью которой является конденсационная установка, которая позволяет осуществлять нагрев пиломатериалов в одной камере за счет тепла, отведенного из другой камеры на стадии вакуумирования. Подобное ведение процесса позволяет снизить энергозатраты на процесс сушки пиломатериалов до 50 % и отказаться от использования массивных емкостей для испарительного охлаждения хладагента конденсатора.

Установка ВОСК-тандем наряду с камерами ВОСК-1 и ВОСК-2 приняты к серийному изготовлению фирмой ЗАО «Ферри Ватт».

С целью апробации результатов исследований процессов, протекающих при совмещенной сушке-пропитке древесины, на предприятии ЗАО «Ласкрафт» на базе имевшейся вакуумной камеры была создана опытно-промышленная установка ВСЖ-1 для сушки массивной древесины в гидрофобных жидкостях, в которой контроль за удалением влаги из материала осуществлялся с помощью замера архимедовой силы, действующей на штабель пиломатериалов, погруженный в гидрофобную жидкость.

Оценка экономической эффективности промышленного использования результатов исследований по совмещенной сушке-пропитке древесины, проведенная с целью определения рентабельности инвестиций в шпалопропиточное производство в условиях малого предприятия, выявила целесообразность создания подобных предприятий, поскольку рентабельность инвестиций составляет более 200 %.

В результате проведенного технико-экономического обоснования, а также теоретических и экспериментальных исследований предложен алгоритм выбора методов и оборудования для сушки пиломатериалов в зависимости от задач проектируемого деревообрабатывающего производства, представленный в виде организационной диаграммы на рис. 11.

Согласно разработанному алгоритму выбора методов сушки пиломатериалов наиболее экономически оправданной при многотонажных производствах столярно-строительных изделий, в особенности из мягких хвойных пород древесины являются конвективные камеры периодического действия с большим объемом загрузки. Однако основным недостатком данных камер является высокая продолжительность процесса и неравномерность высушивания штабеля пиломатериалов, что, в свою очередь, влечет большие энергозатраты и неудовлетворительное качество конечного продукта. Поэтому на базе исследований вакуумно-конвективной сушки древесины разработаны схемы модернизации существующих сушильных камер конвективного действия.

В результате модернизации лесосушильных камер на предприятии ПСФ «Карпентер» была организована поперечно-вертикальная схема циркуляции, которая позволила получить перепад влажности пиломатериалов по штабелю менее 1,5%, что удовлетворяет условиям сушки по II категории качества. В результате проведенной модернизации произошло сокращение продолжительности процесса сушки на 20 – 30 % в зависимости от сортиментов. Сокращение сроков сушки объясняется равномерным удалением влаги по всему объему штабеля. Кроме того, организованная по-

перечно-вертикальная схема циркуляции сушильного агента позволила проводить процесс при неполной загрузке лесосушильной камеры. По данной схеме было модернизировано шесть камер сушильного цеха.



Рис. 11. Организационная диаграмма выбора способа и оборудования для сушки пиломатериалов.

Усовершенствование сушильного участка на предприятии «Вельд» позволила увеличить объем разовой загрузки пиломатериалов. При этом была организована поперечно-горизонтальная схема циркуляции сушильного агента, выравнивание скорости которого по высоте штабеля производилось с помощью установленных боковых перфорированных стенок. Необходимое тепловое и циркуляционное оборудование было установлено в верхней части камеры и в боковых зазорах, образованных перфорированными стенками. Реализованная схема модернизации позволила увеличить производительность камеры при одновременном предотвращении неравномерности высушивания штабеля.

В результате проведенных модернизаций предприятия «Карпентер» и «Вельд» получили годовой экономический эффект в размере соответственно 1147 и 495 тыс. руб.

В шестой главе приведены результаты по модернизации существующих или созданию новых технологий и оборудования в смежных областях промышленности,

в основе которых лежат проведенные исследования вакуумно-конвективной сушки капиллярнопористых коллоидных материалов. Результаты представленных в данной главе исследований создают почву для дальнейшего развития и более детального исследования смежных процессов.

Проведенные исследования позволили усовершенствовать вакуумно-кондуктивную технологию сушки древесины, основным недостатком которой были неравномерность по толщине высушиваемого пиломатериала и высокие внутренние напряжения. Реализованный механизм удаления влаги с «импульсным» подводом тепла от двух плит позволил избежать указанных недостатков.

Сущность данных режимов заключается в цикличном проведении сушильного процесса. При этом в качестве нагревательных элементов используются плиты специальной конструкции, представляющие собой две перфорированные металлические пластины с установленными между ними змеевиковыми нагревателями. Таким образом подвод тепловой энергии осуществляется с обеих пластей пиломатериала, а отвод испарившейся влаги происходит через перфорации металлических пластин, что обеспечивает симметричное распределение влагосодержания и, как следствие, уравновешивание внутренних напряжений в процессе сушки.

Предложенная технология вакуумно-кондуктивной сушки является развитием вакуум-осциллирующего метода и может проводиться по аналогичным режимным параметрам.

Результатом теоретического исследования вакуумно-кондуктивного способа удаления влаги явилось промышленное внедрение вакуумной камеры для сушки перги – продукта пчелиной переработки, использующегося при производстве лекарственного средства на предприятии «Корт». Выбор указанного способа сушки был обоснован высокой гигроскопичностью данного продукта и жесткими требованиями по санитарно-гигиеническим нормам и режимным параметрам процесса: допустимая температура кратковременного нагрева не более 45 °С.

В результате проведенных испытаний вакуумной сушильной камеры, общая продолжительность сушки перги от начальной влажности 40 % до требуемой конечной 3-4 % составило менее 4 суток. Экономический эффект составил более 1 млн. руб. в год.

Процессы вакуумной сушки пиломатериалов сопровождаются отводом тепловой энергии из аппарата в процессе понижения давления, что приводит к повышению температуры оборотных вод, в результате для их повторного использования требуется предварительное охлаждение. Анализ существующей проблемы на предприятии ЗАО «Нарат» выявил потенциальные возможности производства и позволил сделать вывод о целесообразности внедрения установки испарительного охлаждения циркуляционной воды в системе оборотного водоснабжения. Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать принципиальную схему установки для охлаждения технологической воды на предприятии.

Изучение процессов прогрева древесины без доступа воздуха легло в основу исследований процессов термического разложения древесины при регулировании

давления среды, для этого была создана лабораторная установка и проведена серия экспериментов.

Экспериментальные исследования кинетики пиролиза при регулировании давления среды выявили, что при увеличении давления в аппарате процесс пиролиза древесины протекает более интенсивно, что объясняется образованием более устойчивых соединений продуктов разложения, сопровождающихся выделением большого количества теплоты, приводящей, в свою очередь, к ускорению процесса разложения. И напротив, понижение давления среды приводит к принудительному удалению летучих веществ и, вследствие этого, снижению температуры в зоне реакции.

В тоже время повышение давления не благоприятствует реакции диссоциации (распада) продуктов обугливания древесины, что способствует большей рекомбинации древесного угля и увеличению его выхода. Разрежение в камере способствует увеличению выхода жидких продуктов, вследствие их быстрого удаления из реакционной зоны.

В результате исследований влияния давления парогазовой смеси в камере на различные периоды процесса обугливания древесины было выявлено, что в целях интенсификации глубокого пиролиза целесообразным является регулирование давления в аппарате в ходе процесса: начальный период термического разложения, требующий подвода значительной тепловой энергии к материалу извне, следует проводить при высоких давлениях среды, в дальнейшем – с целью удаления тяжелых фракций давление целесообразно понижать.

Разработанная экспериментальная установка и проведенная серия опытов показали возможность использования предложенного метода пиролиза древесины при регулировании давления среды в промышленных условиях, в связи с этим на основе аналитических и патентных исследований была разработана промышленная углевыжигательная печь, в которой обеспечивается улов ценных летучих компонентов, а также предварительная подсушка сырья и охлаждение готового продукта. Предложенная конструкция позволяет сократить продолжительность цикла в 1,5 раза и управлять процессом пиролиза с целью получения необходимых продуктов разложения древесины.

**В приложении** к работе приведены элементы программ расчета исследуемых процессов на ПЭВМ, результаты статистической обработки полученных данных и акты внедрений, подтверждающие практическое использование основных результатов работы предприятиями, результаты промышленных испытаний и паспорта созданных установок.

### Основные результаты работы

1. Применение методологического подхода к исследованию технологических процессов, протекающих при вакуумной сушке капиллярнопористых коллоидных материалов при конвективных способах подвода тепловой энергии позволило впервые научно обосновать и разработать единую методику исследования данных про-

цессов, с помощью которой решены задачи интенсификации и управления явлениями переноса.

2. На основе единой методики исследования и теории тепломассопереноса разработаны методы расчета совмещенных процессов тепломассообмена обрабатываемого материала со средой и тепломассопереноса внутри материала в процессе конвективного обтекания листового материала инертным газом, насыщенным паром и гидрофобной жидкостью, а также в процессе понижения давления среды.

3. Разработана обобщенная модель процессов вакуумной сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов с конвективными методами подвода тепла, позволяющая прогнозировать характер протекания процесса, выявить пути его интенсификации, а также обоснованно рассчитать оборудование и рациональные режимные параметры.

4. Предложен алгоритм расчета исследуемых процессов и компьютерная программа для моделирования. По известным экспериментальным данным получены функциональные зависимости теплофизических, массопроводных и механических характеристик древесины с целью увеличения точности и повышения автоматизации расчетов.

5. Созданы экспериментальные установки для исследования указанных процессов. Отдельные решения, положенные в основу лабораторных установок, в дальнейшем нашли использование в аппаратурном оформлении процессов сушки. Экспериментальные установки используются в учебном процессе и позволяют оперативно готовить опытные образцы и осуществлять всестороннее изучение процессов сушки древесины.

6. По результатам математического моделирования выданы рекомендации по режимным параметрам исследуемых процессов: установлена целесообразность прогрева в среде перегретого пара пиломатериалов с высокой начальной влажностью, с также повышение давления в аппарате при снижении влагосодержания ниже предела гигроскопичности в процессах конвективной сушки в разреженной среде, рассмотрена возможность регулирования процесса в зависимости от дифференциальной усадки высушиваемого пиломатериала.

7. Разработаны технологии вакуум-осциллирующей сушки в среде перегретого пара и конвективной сушки в разреженном горячем воздухе, новизна которых подтверждается патентами РФ.

8. Показана целесообразность проведения процессов по комбинированной схеме с подводом тепловой энергии различными способами с целью повышения качества и сокращения продолжительности сушки.

9. Созданы и внедрены в производство опытно-промышленные вакуумные сушильные камеры, на базе которых разработаны принципиально новые конструкции вакуумных сушилок с большой производительностью. Новизна конструкций и способов организации процессов, протекающих в этих аппаратах, подтверждена патентами РФ. Разработанные конструкции аппаратов приняты к серийному изготовлению предприятием ЗАО «Ферри Ватт», специализирующимся на производстве

вакуумного оборудования.

10. Проведенные исследования легли в основу модернизаций существующих конвективных сушильных камер, которые позволили сократить продолжительность и предотвратить неравномерность высушивания штабеля пиломатериалов.

11. Разработаны новые режимы вакуумно-кондуктивной сушки с «импульсным» подводом тепла от двух перфорированных плит. Предложенная технология внедрена в производство для сушки продуктов пчелиной переработки на предприятии «Корт».

12. Проведенные исследования могут лечь в основу разработки научных направлений по испарительному охлаждению, сушке термолабильных фармацевтических продуктов и термомодифицированию древесины.

13. Научные и прикладные результаты исследований переданы предприятиям и проектным организациям в виде методик расчетов процессов сушки, отчетов, проектов и рекомендаций для реконструкции и проектирования сушильного процесса и оборудования. Суммарный годовой экономический эффект от внедрений составил более 4 млн. руб.

### Условные обозначения

$P$ ,  $p$  – полное и парциальное давление, Па;  $T$  – температура, К;  $m$  – масса, кг;  $V$  – объем,  $m^3$ ;  $\rho$  – плотность,  $kg/m^3$ ;  $U$  – влагосодержание материала,  $kg/kg$ ;  $W$  – влажность материала, %;  $\mu$  – молекулярная масса,  $kg/kmol$ ;  $c$  – удельная теплоемкость,  $Dж/(kg \cdot K)$ ;  $r$  – скрытая теплота парообразования,  $Dж/kg$ ;  $\varepsilon$  – критерий парообразования;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $Dж/(kmol \cdot K)$ ;  $A$ ,  $B$  – коэффициенты в уравнении Антуана;  $a_p$ ,  $n$  – коэффициенты в уравнении изотермы Фрейндлиха;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Dж/(m \cdot c \cdot K)$ ;  $a_t$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/c$ ;  $a_m$  – коэффициент массопроводности,  $m^2/c$ ;  $\delta$  – относительный термоградиентный коэффициент,  $1/K$ ;  $\delta^*$  – толщина пленки конденсата,  $m$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $Dж/(m^2 \cdot c \cdot K)$ ;  $w$  – скорость потока,  $m/c$ ;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи,  $m/c$ ;  $\beta'$  – коэффициент температурного расширения,  $1/K$ ;  $k_p$  – коэффициент молярного переноса,  $c$ ;  $K$  – коэффициент теплопередачи,  $Dж/(m^2 \cdot c \cdot K)$ ;  $\tau$  – текущее время,  $c$ ;  $\tau_{пр1}$  – время начала прогрева при фазовых переходах теплоносителя;  $\tau_{прII}$  – время начала прогрева в среде перегретого пара или горячего воздуха;  $\tau_{p1}$  – время начала процесса понижения давления;  $\tau_{p2}$  – время начала процесса сушки при стационарном пониженном давлении;  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\ell$  – координаты;  $F$  – площадь поверхности,  $m^2$ ;  $F_m^*$  – удельная поверхность материала, приходящаяся на объем теплоносителя, который находится в сушильной камере,  $m^2/m^3$ ;  $j$  – поток массы,  $kg/(m^2 \cdot c)$ ;  $\Delta \bar{U}$  – изменение интегрального влагосодержания материала,  $kg/kg$ ;  $s = 2R^*$  – толщина пиломатериала,  $m$ ;  $C'$  – расстояние от центра доски до зоны с влажностью ниже предела гигроскопичности,  $m$ ;  $\sigma$  – поверхностное натяжение,  $kg/m$ ;  $\sigma^*$  – напряжение, Па;  $E$  – модуль упругости, Па;  $\alpha'$  – коэффициент усушки,  $1/\%$ ;  $b$  – ширина пиломатериала,  $m$ ;

$l$  – длина в направлении потока, м;  $\theta$  – краевой угол смачивания, град;  $h$  – высота, м;  $Q$  – объемная производительность,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $V_{\text{св}}$  – объем аппарата незанятый материалом,  $\text{м}^3$ ;  $k$  – постоянная Генри;  $G$  – массовый расход,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $\mu'$  – коэффициент расхода;  $k'$  – показатель адиабаты;  $\Delta t_{\text{ср}}$  – средний температурный напор, К. Индексы: в – пар, поступающий в камеру из парогенератора; п – пар; ср – среда; к – пар, конденсирующийся на поверхности пиломатериалов; пг – парогенератор; м – материал; пов – поверхность; кап – капилляр; д.в. – древесинное вещество; б – базисная; ж – жидкость; с.м – абсолютно сухой материал; вл.м – влажный материал; рав – равновесное; п.г – предел гигроскопичности; с.п – система удаления пара; с.г – система удаления газа; кон – конденсатор; пр – прогрев; проп – пропитка; вн – вакуумный насос; кал – калорифер; ост – остаточное; атм – атмосферное; пер – перегретый; нас – насыщенный; 0 – начальный; кн – конечный; ц – цикл; цен – центр.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### **Монография:**

1. Сафин Р.Р. Вакуумная сушка пиломатериалов при конвективном теплоподводе: Монография [Текст] / Р.Р.Сафин. – Казань: КГТУ, 2006 г. – 124 с. – ISBN 5-7882-0308-2.

#### **Статьи в ведущих рецензируемых журналах:**

2. Сафин, Р.Р. Математическая модель конвективной сушки коллоидных капиллярнопористых материалов при давлении ниже атмосферного [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин // Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2005 г. – №1. – С. 266-273.

3. Сафин, Р.Р. Энергосбережение: современный подход к повышению эффективности деревообрабатывающих предприятий России [Текст] / Р.Р. Сафин, А.В. Беляева // Деревообрабатывающая промышленность. – 2005 г. – № 3. – С. 11-13.

4. Сафин, Р.Р. Математическое моделирование процесса пиролиза древесины при регулировании давления среды [Текст] / Р.Р. Сафин, И.А. Валесв, Р.Г. Сафин // Лесной вестник. – 2005 г. – № 2 (38). – С. 168-174.

5. Сафин, Р.Г. Вакуум-осциллирующая сушка пиломатериалов в среде перегретого пара [Текст] / Р.Г. Сафин, В.А. Лашков, Л.Г. Голубев, Р.Р. Сафин // Лесной вестник. – 2002 г. – № 2 (22). – С. 175-179.

6. Сафин, Р.Р. Экспериментальное исследование влияния давления при пиролизе древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, И.А. Валесв, Р.Г. Сафин // Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2005 г. – №1. – С. 256-260.

7. Сафин, Р.Р. Новые подходы к совершенствованию вакуумно-конвективных технологий сушки древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, П.А. Кайнов, Р.Г. Сафин // Деревообрабатывающая промышленность. – 2005 г. – № 5. – С. 16-19.

8. Сафин, Р.Р. Теплоадаптация в процессе сушки-пропитки древесины в жидких средах [Текст] / Р.Р. Сафин // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – Приложение №6. – С. 93-99.

9. Сафин, Р.Р. Математическая модель процесса конвективной сушки пиломатериалов в разреженной среде [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2006. – №4. – С. 64-71.

10. Сафин, Р.Р. Современные тенденции развития технологии сушки древесины [Текст] / Р.Р. Сафин // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. – 2006. – Том.11, вып. 4. – С. 583-585.

11. Сафин, Р.Р. Исследование процессов вакуумной сушки пиломатериалов при конвективных методах подвода тепла [Текст] / Р.Р. Сафин // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, №4А. – С. 987-993.

12. Сафин, Р.Р. Экспериментальное исследование процесса вакуумной сушки деревянных шпал в гидрофобных жидкостях [Текст] / Р.Р. Сафин, З.Р. Мустафин // Лесной вестник. – 2007 г. – № 1 (50). – С. 81-83.

13. Сафин, Р.Г. Математическая модель вакуум-осциллирующей сушке пиломатериалов [Текст] / Р.Г. Сафин, В.А. Лашков, Л.Г. Голубев, Р.Р. Сафин // ИФЖ. – 2002 г. – Т. 5. – № 2. – С. 95-98.

#### **Патенты:**

14. Патент №2156934 Российская Федерация, МПК F 26 В 9/06. Установка для сушки древесины / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, В.А. Лашков и др.; патентообладатель НТЦ РТО; опубл. 27.11.2000.

15. Патент №2186305 Российская Федерация, МПК F 26 В 5/04, 7/00. Способ сушки пиломатериалов / Р.Р. Сафин, В.А. Лашков и др.; патентообладатель НТЦ РТО; опубл. 27.07.2002.

16. Патент №2179929 Российская Федерация, МПК В 29 В 15/02//В 29 К 21/00. Аппарат для концентрирования полимерной крошки / Р.Р. Сафин, Р.Т. Шияпов и др.; патентообладатель НТЦ РТО; опубл. 27.02.2002.

17. Патент №2206843 Российская Федерация, МПК F 26 В 9/06, 5/04. Установка для сушки древесины / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин; патентообладатель НТЦ РТО; опубл. 20.06.2003.

18. Патент №2279612 Российская Федерация, МПК F 26 В 5/04. Способ сушки пиломатериалов / Р.Р. Сафин, Е.К. Воронин и др.; патентообладатель НТЦ РПО; опубл. 10.07.2006.

19. Патент №2184909 Российская Федерация, МПК F 23 G 7/06. Установка для сжигания газовых выбросов / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, В.А. Лашков и др.; патентообладатель НТЦ РТО; опубл. 10.07.2002.

20. Патент №2185961 Российская Федерация, МПК В 29 С 47/76, В 7/84. Установка для получения наполненных пластиков, преимущественно стекловолокниста / Р.Р. Сафин, В.А. Лашков, Р.Р. Сафин и др.; патентообладатель НТЦ РТО; опубл. 27.07.2002.

21. Патент №2200284 Российская Федерация, МПК F 25 D 9/00, F 28 D 5/00, С 02 F 1/42. Пароэжекторная установка для охлаждения воды / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, В.А. Лашков, А.А. Нелюбин и др.; патентообладатель НТЦ РТО; опубл. 10.03.2003.

22. Патент №2256686 Российская Федерация, МПК С 10 В 1/4, 53/02. Углевывжигательная печь / Р.Р. Сафин, И.А. Валеев и др.; патентообладатель НТЦ РТО; опубл. 20.07.05.

23. Патент №2274851 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/50. Устройство для определения параметров воспламенения и горения твердых материалов / Р.Р. Сафин, А.Н. Грачев и др.; патентообладатель НТЦ РПО; опубл. 20.04.06.

24. Патент №2281198 Российская Федерация, МПК В 27 В 1/00. Способ раскряя круглых лесоматериалов, имеющих сердцевинную гниль / А.С. Торопов, Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, Е.С. Шараров; патентообладатель МарГТУ; опубл. 10.08.06.

#### **Публикации в прочих изданиях:**

25. Сафин, Р.Р. Вакуумные технологии сушки [Текст] / Р.Р. Сафин // *Дерево.ру*, 2006 г. – № 2. – С. 48-50.

26. Сафин, Р.Р. Термическая переработка древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, И.А. Валеев // *Дерево.ру*, 2006 г. – № 2. – С. 136-139.

27. Сафин, Р.Р. Энергетическая ценность отходов древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, А.Н. Грачев // *Дерево.ру*, 2006 г. – № 1. – С. 124-125.

28. Сафин, Р.Р. Современное состояние техники сушки пиломатериалов [Текст] / Р.Р. Сафин // *Деловой лес*. – 2003. – № 10 (34). – С. 44-45.

29. Сафин, Р.Р. ТЭК России: новые технологии [Текст] / Р.Р. Сафин, А.В. Беляева, О.В. Газизова // *Ресурсоэффективность в РТ*. – 2005. – № 1. – С.50-52.

30. Сафин, Р.Г. Математическое моделирование вакуумной сушки пиломатериалов с конвективным подводом тепла [Текст] / Р.Г. Сафин, Л.Г. Голубев, Р.Р. Сафин // *Тезисы докладов V Минского международного форума по тепло- и массообмену*. – Минск, 2004. – Т. 2. – С. 248-250.

31. Сафин, Р.Р. Математическая модель капиллярно-пористых материалов при конвективном теплоподводе [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, А.В. Беляева, Л.Н. Герке, И.Н. Артемов // *Энергоресурсосберегающие технологии и системы в АПК: Межвуз. сб. науч. тр. / Саранск, МГУ им. Огарева*. – 2004. – С. 106 – 109.

32. Сафин, Р.Р. Управление технологическими процессами, протекающими при понижении остаточного давления среды [Текст] / Р.Р. Сафин, В.А. Лашков, Е.К. Воронин // *Успехи в химии и технологии*. – 2003. – Т. XVII. – №6 (31). – С. 116-120.

33. Лашков, В.А. Регенерация сорбционной емкости капиллярно-пористых материалов электровакуумным способом [Текст] / В.А. Лашков, Е.К. Воронин, Р.Р. Сафин // *Успехи в химии и технологии*. – 2003. – Т. XVII. – № 10. – С. 124-127.

34. Сафин, Р.Р. Современные технологии вакуумной сушки пиломатериалов твердых пород древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, П.А. Кайнов, Р.Г. Сафин // *Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы): Тр. Междунар. конф.* – М., 2005. – Т.1. – С. 386-388.

35. Лашков, В.А. Тепломассоперенос в парогазовой фазе при понижении давления среды над поверхностью влажного материала или раствора [Текст] / В.А. Лашков, Р.Р. Сафин, Е.К. Воронин // *Успехи в химии и технологии*. – 2003. – Т. XVII. – №

13. – С. 110-113.

36. Сафин, Р.Р. Тепломассообмен в процессах совмещенной сушки-пропитки деревянных шпал [Текст] / Р.Р. Сафин, Н.Р. Галяветдинов, Р.Г. Сафин, А.С. Торопов // НКТЭ-2006: Матер. докл. национальной конференции по теплоэнергетике. / Казань. – 2006 г. – Т.1. – С.249-253.

37. Сафин, Р.Р. Вакуум-осциллирующая сушка пиломатериалов [Текст] / Р.Р. Сафин, Л.Г. Голубев, А.И. Расев // Современные энергосберегающие тепловые технологии. – М. – 2002. – С. 191-193.

38. Сафин, Р.Р. Функциональная связь оборудования для улавливания паров и газов с основным аппаратом химико-технологического комплекса в процессах, протекающих при понижении давления среды [Текст] / Р.Р. Сафин, В.А. Лашков, Е.К. Воронин // Успехи в химии и технологии. – 2003. – Т. XVII. – №13 (38). – С. 101-105.

39. Сафин, Р.Р. Снижение энергозатрат конвективных сушилок путем оптимизации расхода сушильного агента по сечению штабеля [Текст] / Р.Р. Сафин, С.А. Хайдаров, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин // Технология и оборудование деревообработки в XXI веке: Межвуз. сб. науч. тр. / Воронеж. – 2005. – С. 57-61.

40. Сафин, Р.Р. Вакуум-осциллирующая сушильная камера [Текст] / Р.Р. Сафин, В.А. Лашков, В.Н. Башкиров, Р.Г. Сафин, Л.Г. Голубев // Методы кибернетики химико-технологических процессов: Тезисы докл. V Международ. науч. конф.: – Казань, 1999. – С.10-11.

41. Сафин, Р.Р. Высокоинтенсивный процесс сушки пиломатериалов [Текст] / Р.Р. Сафин, В.А. Лашков, Р.Г. Сафин, Л.Г. Голубев // Лес-2000: Тезисы докл. Международ. науч. конф. / Брянск, 2000. – С. 13.

42. Сафин, Р.Р. Энергосберегающие технологии сушки твердых пород древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин, А.С. Торопов // Ресурсоэффективность и энергосбережение: Тр. V Международ. симп. / Казань: Изд-во КГУ, 2004. – С. 564-570.

43. Лашков, В.А. Тепломассоперенос при сушке пиломатериалов методом понижения давления [Текст] / В.А. Лашков, Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, А.С. Торопов // Тепломассообменные процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. сб. науч. тр. / Казань: КГУ. – 2000. – С. 54-58.

44. Сафин, Р.Р. Сушка пиломатериалов в вакуум-осциллирующем режиме [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, В.А. Лашков, Э.А. Зайнутдинов, Е.И. Левашко // Тезисы докл. III Международ. симп. «Строение, свойства и качество древесины-2000» / Петрозаводск: Ин-т леса КарНЦ РАН. – 2000. – С. 286-289.

45. Сафин, Р.Р. Комплексная переработка всей биомассы деревьев в местах лесоразработок [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, В.Н. Башкиров, И.А. Валеев // Химико-лесной комплекс: Сб. ст. / Красноярск. – 2002. – С. 146-147.

46. Лашков, В.А. Вакуумная сушка растительных веществ в осциллирующем режиме [Текст] / В.А. Лашков, Р.Г. Сафин, Р.Р. Сафин, И.И. Исламов, И.Х. Хусаенов // Химия и технология растительных веществ: Тезисы докл. Всерос. конф. / Сыктывкар. – 2000. – 133-135.

47. Сафин, Р.Р. Экспериментальные исследования в области вакуумно-конвективной сушки пиломатериалов [Текст] / Р.Р. Сафин, В.А. Лашков, Р.Г. Сафин, Л.Г. Голубев // Химико-лесной комплекс – научное и кадровое обеспечение в XXI веке. Проблемы и решения: Тезисы докл. Международ. науч.-практич. конф. / Красноярск, 2000. – С. 264-266.

48. Сафин, Р.Р. Математическая модель стадии прогрева при вакуум-осциллирующей сушке пиломатериалов [Текст] / Р.Р. Сафин, И.Н. Маннапов, В.А. Лашков, Р.Г. Сафин // ММТТ-14: Тезисы докл. Международ. конф. / Смоленск, 2001 – С. 40.

49. Сафин, Р.Р. Сушка пиломатериалов в вакуум-осциллирующей камере [Текст] / Р.Р. Сафин, В.А. Лашков, Л.Г. Голубев, Е.К. Воронин // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. / Брянск, 2001. – С. 13.

50. Сафин, Р.Р. Установка очистки и охлаждения возвратных сточных вод [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, В.А. Лашков, А.В. Петрова, А.А. Нелюбин // Химико-лесной комплекс – проблемы и решения: Сб. ст. / Красноярск, 2001. – С. 247-249.

51. Сафин, Р.Р. Результаты моделирования вакуум-осциллирующей сушки пиломатериалов [Текст] / Р.Р. Сафин, В.А. Лашков, Р.Р. Хазиев, Д.А. Назаров // ММТТ-15: Тезисы докл. Международ. конф. / Тамбов, 2002. – С. 47-48.

52. Сафин, Р.Р. Установка для сушки древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, В.А. Лашков, Г.Н. Фиров, Т.А. Федорова // Лучшее изобретение года: Бюл. ежегод. конкурса среди изобретателей РТ / Казань, 2001. – №2. – С. 29.

53. Сафин, Р.Р. Вакуумная сушка древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, П.А. Кайнов, Р.Г. Казаков, Р.Г. Сафин // Вакуумная техника и технология: Тезисы докл. науч.-техн. конф. / Казань: КГТУ, 2003. – С. 58.

54. Сафин, Р.Р. Исследование коэффициента молярного переноса при вакуумной сушке [Текст] / Р.Р. Сафин, С.В. Игушин, Р.Г. Сафин // Вакуумная техника и технология: Тезисы докл. науч.-техн. конф. / Казань: КГТУ, 2003. – С. 18.

55. Сафин, Р.Р. Учет влияния градиента давления на процесс вакуум-осциллирующей сушки пиломатериалов [Текст] / Р.Р. Сафин, С.В. Игушин, П.А. Кайнов, Р.Г. Сафин // ММТТ-16: Тезисы докл. XVI Международ. науч. конф. / СПб, 2003. – С. 39.

56. Сафин, Р.Р. Перспективы вакуумной сушки древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, П.А. Кайнов, С.В. Игушин, Р.Г. Сафин // Лесной и химический комплексы: проблемы и решения: Тезисы докл. Всерос. науч.-практ. конф. / Красноярск, 2003. – С. 202-204.

57. Сафин, Р.Р. Исследование сушки древесины в гидрофобных жидкостях [Текст] / Р.Р. Сафин, С.В. Игушин, Р.Г. Сафин // ММТТ-17: Тезисы докл. Международ. науч. конф. / Кострома, 2004. – С.100-101.

58. Сафин, Р.Р. Пиролизная установка для переработки древесных материалов [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, И.А. Валеев // ММТТ-17: Тезисы докл. Международ. науч. конф. / Кострома, 2004. – С.113.

59. Сафин, Р.Р. Исследование конвективной сушки пиломатериалов при ста-

ционарном пониженном давлении [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин, А.С. Торопов // ММТТ-17: Тезисы докл. Международ. науч. конф. / Кострома, 2004. – С. 101.

60. Сафин, Р.Р. Ресурсосберегающая технология переработки древесных отходов [Текст] / Р.Р.Сафин, Р.Г. Сафин, И.А. Валеев, А.Н. Грачев // Лес-2004: Сб. науч. тр. V Международ. науч.-техн. конф. / Брянск, 2004. – С. 121-123.

61. Сафин, Р.Р. Вакуум-осциллирующая сушка древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, П.А. Кайнов, Р.Г. Сафин // Лес-2004: Сб. науч. тр. V Международ. науч.-техн. конф. / Брянск, 2004. – С. 251-253.

62. Сафин, Р.Р. Ресурсосберегающие технологии сушки древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин, П.А. Кайнов // Энергоресурсосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные производства: Матер. Международ. науч. конф. / Иваново, 2004. – С. 48.

63. Сафин, Р.Р. Установка для пирогенетической переработки древесных отходов [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, И.А. Валеев, А.Н. Грачев // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: Сб. ст. Всерос. науч.-практич. конф. / Красноярск, 2004. – С. 65-70.

64. Сафин, Р.Р. Конвективная сушка древесины при стационарном пониженном давлении [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин // Лесной и хим. комплексы – проблемы и решения: Сб. ст. Всерос. науч.-практич. конф. / Красноярск, 2004. – С. 70-73.

65. Сафин, Р.Р. Учет влияния градиента давления на процесс вакуум-осциллирующей сушки пиломатериалов [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, П.А. Кайнов, Е.К. Воронин // Строение, свойства и качество древесины: Тр. IV Международ. симпозиума. / СПб., 2004. – С. 521-523.

66. Сафин, Р.Р. Исследование конвективной сушки пиломатериалов при стационарном пониженном давлении [Текст] / Р.Р.Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин, Е.К. Воронин // Строение, свойства и качество древесины: Тр. IV Международ. симпозиума. / СПб., 2004. – С. 523-526.

67. Сафин, Р.Р. Использование древесных отходов в энергетическом хозяйстве [Текст] / Р.Р. Сафин, И.А. Валеев, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин // Научный потенциал мира: Тезисы докл. Международ. науч.-практич. конф. / Днепрпетровск, 2004. – С. 71-75.

68. Сафин, Р.Р. Сушка в технологическом процессе производства оцилиндрованных бревен для домостроения [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, С.А. Хайдаров, Р.Г. Сафин // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. / Брянск, 2004. – Вып. 9. – С. 160 – 163.

69. Сафин, Р.Р. Вакуумные технологии в деревообработке [Текст] / Р.Р. Сафин Р.Р., А.С. Торопов, Р.Р. Хасаншин // Вакуумная техника и технология: Матер. II Рос. науч.-техн. конф. / Казань: КГТУ, 2005. – С. 88-89.

70. Сафин, Р.Р. Аэродинамика вакуумно-конвективных камер для сушки пиломатериалов [Текст] / Р.Р. Сафин, А.Р. Савельев, С.А. Хайдаров // Вакуумная техника

- и технология: Матер. II Рос. науч.-технич. конф. / Казань: КГТУ, 2005. – С. 92-93.
71. Сафин, Р.Р. Перспективный способ вакуумной сушки влажных коллоидных капиллярнопористых материалов [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин // Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика: Сб. матер. XVII Всерос. межвуз. науч.-технич. конф. / Казань: Изд-во КГТУ, 2005. – Ч.2. – С. 182-183.
72. Сафин, Р.Р. Математическая модель стадии охлаждения древесного угля [Текст] / Р.Р. Сафин, И.А. Валеев, Р.Г. Сафин // ММТТ-18: Сб. тр. XVIII Междуна-род. науч. конф. / Казань: Изд-во КГТУ, 2005. – С. 135.
73. Левашко, Е.И. Тепломассообмен при прогреве коллоидных капиллярнопо-ристых материалов в среде насыщенного пара [Текст] / Е.И. Левашко, Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин // ММТТ-18: Сб. тр. XVIII Международ. науч. конф. / Казань: Изд-во КГТУ, 2005. – С. 136-137.
74. Сафин, Р.Р. Повышение эффективности сушильных камер путем оптимиза-ции гидродинамических потоков [Текст] / Р.Р. Сафин, С.А. Хайдаров, Р.Г. Сафин // Ресурсоэффективность и энергосбережение: Тр. V Международ. симпозиума. / Ка-зань: Изд-во КГУ, 2004. – С. 560-563.
75. Сафин, Р.Р. Инновационные энергосберегающие технологии в топливно-энергетическом комплексе России [Текст] / Р.Р. Сафин, А.В. Беляева, О.В. Газизова // Ресурсоэффективность и энергосбережение: Тр. V Международ. симпозиума. / Ка-зань: Изд-во КГУ, 2004. – С. 670-674.
76. Сафин, Р.Р. Исследование влияния давления на процесс пиролиза древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, И.А. Валеев, Р.Г. Сафин // Технология и оборудование дерево-обработки в XXI веке: Межвуз. сб. науч. тр. / Воронеж, 2005. – С. 54-57.
77. Сафин, Р.Р. Тепломассоперенос в процессе конвективной сушки пиломате-риалов при стационарном пониженном давлении [Текст] / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процес-сы): Тр. Международ. конф. – М., 2005. – Т.1. – С. 355-358.
78. Сафин, Р.Р. Контроль за развитием внутренних напряжений в процессах сушки древесины [Текст] / Р.Р. Сафин, З.Р. Мустафин // Проблемы использования и воспроизводства лесных ресурсов: Матер. науч.-практ. конф. / Казань, 2006 г. – С. 307-309.
79. Сафин, Р.Р. Установка для анализа влагосодержания древесных материалов [Текст] / Р.Р. Сафин, Л.Р. Юнусов // Проблемы использования и воспроизводства лесных ресурсов: Матер. науч.-практ. конф. / Казань, 2006 г. – С. 310-311.

Формат 60x84/16 Тираж 100. Подписано и печати 3.04.2007г.  
 Печать офсетная. Усл.п.л. 2,00. Заказ 58.  
 Издательство КГАУ/420015 г.Казань, ул.К.Маркса, д.65  
 Лицензия на издательскую деятельность код 221 ИД №06342 от 28.11.2001 г.  
 Отпечатано в типографии КГАУ  
 420015 г.Казань, ул.К.Маркса, д.65.  
 Казанский государственный аграрный университет