

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертационную работу  
Шагеевой Адилы Ильсуровны на тему «Вакуумная СВЧ-сушка  
пиломатериалов в осциллирующем режиме», представленную на соискание  
ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование  
для лесного хозяйства и переработки древесины**

**Актуальность темы рассматриваемого диссертационного исследования** не вызывает принципиальных сомнений и обусловлена тем, что существующие в настоящее время классические технологии и оборудование для сушки древесины характеризуются большими энергетическими и временными затратами на ведение процесса, а также могут приводить к неконтролируемым внутренним напряжениям и деформации по сечению толстых сортиментов.

Представленный в работе вакуумный СВЧ способ сушки пиломатериалов, осуществляемый в режиме осцилляции давления среды с попеременным чередованием стадий СВЧ нагрева и вакуумирования, является весьма перспективным, так как позволяет проводить процесс без значительных перепадов влажности по толщине. Установлено, что предлагаемый режим СВЧ-сушки позволяет высушивать пиломатериалы в 5 раз быстрее в сравнении с традиционной конвективной сушкой. Благодаря положительному действию градиентов температуры, давления и влажности при данном режиме СВЧ-сушки наблюдается как равномерное влагоудаление по толщине пиломатериала, так и выравнивание температуры. Это позволяет избежать критических напряжений и деформаций в процессе сушки.

Для решения задачи повышения энергоэффективности процессов сушки пиломатериалов в СВЧ среде исследована возможность применения альтернативных источников энергии для обеспечения автономной и эффективной работы сушильной установки.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Диссертационная работа Шагеевой Адилы Ильсуровны на тему «Вакуумная СВЧ-сушка пиломатериалов в осциллирующем режиме» является логически завершенной, построена традиционным способом, характерным для кандидатских диссертаций, и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Диссертационная работа изложена на 129 страницах, включающих 39 рисунков и 12 таблиц. Библиографический список включает 103 наименования цитируемых работ, из них 83 источника российских авторов и 20 наименований работ зарубежных исследователей.

Во введении обосновывается актуальность избранной темы, анализируется степень ее изученности, формулируются определенные автором цель и задачи

исследования, раскрывается методология, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, вопросы реализации результатов научных исследований.

В первой главе диссертации, разделенной на 3 раздела, соискателем приведен довольно подробный анализ ранее проведенных исследований в области СВЧ-сушки древесины; рассмотрена физическая сущность СВЧ-нагрева материалов; проанализировано воздействие электрофизических параметров древесины, таких как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь на процесс СВЧ-сушки. На основании проведенного литературного обзора диссертантом были определены пути решения актуальной задачи по обеспечению регулируемого подвода энергии в процессах СВЧ-сушки для обеспечения равномерного нагрева по сечению сортиментов.

Во второй главе диссертации «Разработка методов расчета процессов сушки пиломатериалов в условиях вакуумных СВЧ-аппаратов», состоящей из четырех разделов и двух подразделов, дается характеристика физической картины процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов. На основе анализа информации предыдущей главы соискателем было определено, что СВЧ-сушку пиломатериалов целесообразно проводить с применением осциллирующего режима нагрева. Диссертантом данный режим рассматривается в двух вариантах: 1) СВЧ нагрев материала с одновременной сушкой в условиях пониженного давления среды с последующей выдержкой при работающем конденсаторе с целью снятия внутренних напряжений; 2) СВЧ нагрев материала при давлении в камере равном или близком атмосферному в условиях, предотвращающих удаление влаги из сортимента, с последующим вакуумированием и выдержкой при остаточном давлении в камере. Соискателем на основе математического описания разработан алгоритм расчета процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме, который позволяет определить количество циклов чередования и продолжительность каждой стадии.

В третьей главе «Экспериментальные и теоретические исследования процессов вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов», состоящей из двух разделов, автором приведены результаты экспериментальных исследований с целью установления соответствия (адекватности) разработанного математического описания изучаемым процессам. Для более точного описания величины влагоотбора от различных факторов, процесс был рассмотрен соискателем в двух интервалах – сушка образцов с влажностью выше и ниже 30 %. Для определения изменения полей температуры и влагосодержания в материале на начальном этапе было проведено математическое моделирование одного полного цикла вакуумной СВЧ-сушки единичных сортиментов сосны в режиме осцилляции давления среды с расположением излучателей на протяжении всего опыта с одной стороны образца перпендикулярно пласти. Определено, что на распределение полей температуры и влагосодержания в сортиментах влияют диэлектрические свойства материала, что подробно изложено соискателем. В ходе анализа полученных кривых было установлено, что нагрев сортимента только с одной стороны приводит к не

симметричному распределению температуры и влагосодержания по сечению сортамента на каждой стадии осциллирующего цикла сушки. Поэтому для выравнивания картины сушки в работе предложено проводить нагрев сортамента с двух противоположных сторон, применяя два цикла облучения с чередующимся включением источника СВЧ излучения справа и слева от пластей сортамента.

С учетом полученных данных соискателем были определены рациональные режимные параметры процесса вакуумной СВЧ-сушки в режиме осцилляции давления среды: определен оптимальный диапазон температуры на стадии «СВЧ нагрев», который составляет порядка 70 – 80 °С; установлено, что поддержание конечного значения градиента температуры на стадии «пауза» в интервале 1,3 – 1,4 °С/мм позволяет высушивать сортимент при наименьшей продолжительности. Удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о том, что разработанная математическая модель адекватно описывает процесс вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов и может быть использована для моделирования и отработки режимных параметров. Расхождение между экспериментальными и расчетными данными составляет 15 – 18 %.

В четвертой главе «Рекомендации к промышленному использованию результатов исследований процесса осциллирующей СВЧ-сушки пиломатериалов», состоящей из четырех разделов и двух подразделов, соискателем на основе математической модели и результатов экспериментальных исследований представлен разработанный энергосберегающий сушильный комплекс осциллирующей СВЧ-сушки пиломатериалов, работающий на генераторном газе, получаемом из древесных отходов. Работа сушильного комплекса реализуется при разных осциллирующих режимах в зависимости от начального содержания влаги в сортаменте, при которых на стадии нагрева используется СВЧ магнетроны. На стадии вакуумирования включаются вакуумный и/или тепловой насосы. Диссертантом представлен технологический регламент, позволяющий управлять процессом вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в зависимости от влагосодержания и толщины сортамента. Разработана инженерная методика расчета основных конструктивных параметров сушильной камеры. В ходе проведенных соискателем расчетов был установлен необходимый для автономной работы сушильного комплекса объем загрузки сушильного бункера с древесными отходами, позволяющий снизить расход древесного топлива и требуемой установленной мощности электрогенератора, обеспечивающего работу агрегатов установки на стадиях нагрева и вакуумирования. Рассчитана экономическая эффективность предлагаемой технологии осциллирующей вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов, выраженная в экономии удельных энергетических затрат.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Вопросами сушки древесины в вакуумной электромагнитной среде занимаются как российские, так и зарубежные ученые, но некоторые процессы, происходящие при СВЧ-сушке, остаются не до конца изученными. В этой связи

представленная работа вносит определенный вклад в развитие данной области науки.

### **Научная новизна исследований и полученных результатов**

Шагеева А.И. выносит на защиту ряд основных положений, обладающих научной новизной и отражающих решение задач диссертационной работы.

Диссертантом предложен новый способ вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в режиме осцилляции давления среды и разработана математическая модель процесса, основанная на законах тепломассопереноса в капиллярно-пористых коллоидных телах.

Впервые определено, что стадию СВЧ нагрева материала целесообразно проводить чередуя между собой два цикла подвода СВЧ энергии с разной стороны пласти сортамента в зависимости от начального содержания влаги в материале: 1) с предварительным удалением воздуха из камеры сушки при влажности выше 30 %; 2) с проведением стадии нагрева при атмосферном давлении в камере сушки, осуществляемой предварительным напуском сухого воздуха в аппарат при влажности древесины ниже 30 %.

Установлены рациональные значения режимных параметров каждой из стадий осциллирующей вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов, оптимальное значение конечного градиента температуры поверхности материала на стадии вакуумирования, которые могут быть использованы для аппаратурного оформления промышленной технологии. Заслуживает внимание, что полученные показатели исследованы относительно различных зон штабеля пиломатериалов.

Получена энергоэффективная схема ведения процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме с применением генераторного газа на отходах деревообработки для обеспечения работы электрогенератора, снабжающего электричеством агрегаты сушильного комплекса на отдельных стадиях нагрева и вакуумирования.

### **Степень обоснованности, достоверности и апробация результатов**

Научные положения, выводы и практические рекомендации, сформулированные в диссертации Шагеевой А.И., обоснованы, так как базируются на значительном экспериментальном материале, полученном с использованием современного оборудования и средств статистической обработки и математического моделирования, а также подтверждаются их сопоставимостью с основными положениями теории тепломассообменных процессов и согласуются с аналогичными результатами исследований других авторов. Положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, подкреплены фактическими данными и наглядно представлены в приведенных таблицах и рисунках.

Основные результаты диссертационной работы изложены в 18 публикациях, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 3 статьи в издании, входящем в реферативную базу Scopus, 1 патент РФ на изобретение.



Результаты диссертационной работы докладывались на всероссийских и международных научно-практических конференциях.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

В результате проведенных исследований разработана технология вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов, осуществляемая в осциллирующем режиме. Разработана математическая модель данного процесса, позволяющая определить влияние режимных параметров на температурные и влажностные поля в материале и продолжительность отдельных стадий процесса. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных с использованием современных методов математического моделирования процессов, прямого эксперимента, представленные в диссертационной работе, определенно имеют научную значимость, поскольку вносят новые знания в область тепло- и массопереноса в процессе сушки пиломатериалов в электромагнитном СВЧ поле.

Разработанные соискателем рекомендации по совершенствованию технологического процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов обеспечивают рост экономической эффективности производства при существенном сокращении продолжительности процесса вследствие проведения сушки в осциллирующем режиме с попеременным включением вакуумного и теплового насосов, СВЧ генератора, работа которых обеспечивается электроэнергией, вырабатываемой благодаря сгоранию генераторного газа в двигателе внутреннего сгорания в процессе газификации древесных гранул.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа и автореферат соответствуют паспорту специальности научных работников 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины: п. 4. Технологии и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах и п. 7. Технологические комплексы, производственные процессы, поточные и автоматические линии, машины и агрегаты в лесном хозяйстве и лесной промышленности.

### **Вопросы и замечания по диссертационной работе**

1. В диссертационной работе предложен способ повышения равномерности сушки на основе результатов математического моделирования изменения полей температуры и влагосодержания внутри материала относительно ширины и высоты штабеля. Не ясно, что рекомендуется для повышения равномерности по длине пиломатериала?

2. Имеется некорректное использование символа  $\xi$ : в уравнении (2.2) он обозначает критерий парообразования, в инженерной методике расчета в уравнении (4.24) данный символ используется в качестве коэффициента местного сопротивления сыпучего материала.

3. В разделе 3.3 соискателем представлено описание разных циклов процесса вакуумной СВЧ-сушки сортиментов сосны с применением осциллирующего режима. Каким образом было осуществлено чередование в смежных циклах электромагнитного излучения относительно исследуемого пиломатериала?

4. Неясно, какое отношение к работе имеет патент № 2732325, приведенный в приложении диссертации и в списке публикаций автореферата.

5. Какая мощность генератора необходима СВЧ-камере с объемом загрузки пиломатериалов 15 м<sup>3</sup> (рассматривается в технико-экономическом обосновании).

6. Некоторые цифры, полученные в технико-экономическом анализе, на мой взгляд, недостаточно обоснованы, например не понятно:

- какова мощность вентиляторов в конвективной камере?

- по какой цене отпускается энергия (электрическая и тепловая) для той же конвективной камеры?

7. В качестве замечания можно также отметить, что можно было бы существенно увеличить объем работы за счет более подробного изложения методики и результатов исследований, тем более, что указанный объем работы, на мой взгляд, существенно ниже традиционно считающегося достаточным.

### Заключение

Указанные замечания не влияют на общее впечатление о работе и ценность основных положений и выводов, приведенных в диссертации. Работа актуальна, имеет научную новизну и прикладное значение. Диссертационная работа Шагеевой Адилы Ильсуровны является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложено новое научно-обоснованное решение задачи по повышению энергоэффективности процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов путем снижения неравномерности распределения электромагнитного поля в сортименте благодаря применению осциллирующего режима, способствующего максимальной интенсификации удаления влаги без возникновения в сортименте критических напряжений и деформаций. Это вносит существенный вклад в экономику и развитие отечественной деревоперерабатывающей промышленности.

Диссертационная работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Автореферат соответствует тексту диссертации. Выводы соответствуют полученным результатам.

В связи с этим считаю, что диссертационная работа Шагеевой Адилы Ильсуровны на тему «Вакуумная СВЧ-сушка пиломатериалов в осциллирующем режиме» соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации

№ 842 от 24.09.2013 г. (в текущей редакции), а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины.

Официальный оппонент: доктор технических наук (05.21.05 Древоисноведение, технология и оборудование деревопереработки), профессор, заведующий кафедрой управления в технических системах и инновационных технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет»

Гороховский Александр Григорьевич

«14» ноября 2023 г.

Адрес: 620100, Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д.37, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»  
Тел. +7(343) 221-21-00  
E-mail: gorokhovskyag@m.usfeu.ru



Подпись Гороховского А.Г. заверяю  
(ФИО)  
Ведущий документовед А.А. Гороховский  
(ФИО)  
14. 11 2023г.

Вход. № 05-7709  
« 05 » 12 2023г.  
подпись AG