

674.04  
Б-74

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

---

Белорусский технологический институт  
имени С. М. Кирова

На правах рукописи

674.047

**В. В. БОГОМАЗОВ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
СКОРОСТНОЙ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ  
В ПОЛЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

(Специальность 05.421. „Машины, оборудование  
и технология лесопильных и деревообраба-  
тывающих производств“)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск, 1970

674.04

Б-74

Министерство высшего и среднего специального образования  
Б. С. С. Р.

БЕЛОРУССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С. М. КИРОВА

На правах рукописи

В. В. БОГОМАЗОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СКОРОСТНОЙ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ  
В ПОЛЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

(Специальность 05.421 "Машины, оборудование и технология  
лесопильных и деревообрабатывающих производств")

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Минск, 1970 год

Б-ка БТИ им. С. М. Кирова  
г. Минск, Свердлова, 13

2274ар.



Работа выполнена в Белорусском технологическом институте  
имени С.М. Кирова

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент  
В.А. БИРКОВ

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор СЕРГОВСКИЙ П.С.

Кандидат технических наук, доцент СПИРИДОНОВ В.М.

Ведущее предприятие – Борисовская фабрика пианино имени  
50-летия Компартии Белоруссии

Автореферат разослан "4" марта 1970 г.

Защита состоится "8" апреля 1970 г.

на заседании Белорусского технологического института  
имени С.М. Кирова

гор. Минск, ул. Свердлова, 13<sup>а</sup>, корпус 4, ауд. 220

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
института.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах с заверенными  
подписями просим направлять по адресу: гор. Минск, ул. Свердлова,  
13<sup>а</sup>, БТИ имени С.М. Кирова, Учёному секретарю Совета.

Учёный секретарь Совета  
кандидат технических наук,  
доцент



И.М. ПЛЕХОВ



Программа развития экономики нашей страны, принятая XXIII съездом КПСС, предусматривает значительное увеличение темпов роста деревообрабатывающей промышленности. Решение этой задачи намечается не только за счёт увеличения объёма выпускаемой продукции, но и за счёт улучшения её качества, совершенствования техники и технологии производства, разработки и внедрения новых высокоэффективных технологических процессов.

В деле повышения качества и эффективности использования лесоматериалов важную роль призвана играть сушка древесины. В условиях непрерывного роста потребления лесоматериалов всеми отраслями промышленности, строительством и сельским хозяйством, увеличение объёма сушки и улучшение её качества является наилучшим способом повышения эффективности их использования.

Успешному решению этих задач может способствовать дальнейшее развитие и совершенствование сушки древесины в электрическом поле высокой частоты. В настоящее время имеется достаточно оснований для более широкого использования этого прогрессивного способа, позволяющего сочетать высокие скорости и качество сушки. Характер технологического процесса ВЧ сушки отвечает всем современным требованиям как по уровню механизации и автоматизации, так и по уровню производительности и культуры производства, а успехи в развитии энергетики и электротехнической промышленности в нашей стране являются хорошей технической базой для этого. Такое же мнение высказано на последней Всесоюзной конференции по сушке древесины и нашим известным учёным И.В. Кречетовым: "Дальнейшим шагом в развитии сушки пиломатериалов будет возврат к токам высокой частоты и использование их для сушки пиломатериалов на новой технической базе".

Высокая себестоимость пока не позволяет говорить о широком использовании ТВЧ для массовой сушки пиломатериалов, но уже сегодня имеется целый ряд специфических производств и экономических районов страны (с дешёвой электроэнергией), где это сулит несомненные выгоды.

В области камерной ВЧ сушки в нашей стране имеется ряд исследований, позволивших осуществить промышленное применение этого способа, однако все они проведены применительно к существующим камерным сушилкам и устаревшим ВЧ генераторам, а поэтому не могут служить базой для широкого промышленного внедрения на современном этапе.

Гораздо менее исследован процесс ВЧ конвейерной сушки, а специальные работы по этому вопросу у нас в стране вообще отсутствуют.

На основании изложенного, можно сделать вывод, что дальнейшие исследования по разработке технологических режимов ВЧ сушки и конструкций установок являются актуальными.

Диссертация состоит из 6 глав, изложенных на 204 страницах машинописного текста с 55 рисунками, выводов, списка использованной литературы и приложений.



В первой главе даётся обзор состояния исследуемого вопроса.

Промышленное применение токов высокой частоты для сушки древесины было впервые предложено и осуществлено в Советском Союзе. Наш приоритет в этой области признают и за границей.

Большой вклад в развитие теории, техники и технологии ВЧ сушки внесли советские учёные: Лыков А.В., Селюгин Н.С., Абраменко С.Н., Жилинская В.А., Поснов Б.А., Лебедев П.Д., Нетушил А.В., Бирюков В.А., Миронов В.П., Бердинских И.П., Першанов Н.А., Мазнин А.Н., Брицки Н.П., Лисенков А.А., Кавказов Ю.Л. Благодаря их работам стало возможным широкое промышленное использование ТВЧ для сушки древесины.

Развитие и совершенствование ВЧ сушки позволило создать ряд комбинированных способов (с использованием конвективного и радиационного нагрева), призванных повысить её эффективность.

В нашей стране с учётом больших объёмов сушки нашли применение только камерные сушилки. Нами рассматриваются преимущества и недостатки различных способов ВЧ камерной сушки, конструкции установок и их оборудование, технологические режимы, отмечается малое количество проведенных в этой области исследований и опубликованных режимов, что сдерживает промышленное внедрение ВЧ сушилок.

Обзор существующих работ показывает, что в зарубежной практике ВЧ камерные сушилки не получили распространения, а режимы и технология сушки заимствована из наших источников. Несравненно более широко используются там конвейерные установки, которые также впервые были предложены и разработаны в Советском Союзе Домановским М.М. и Жилинской В.А. Предложенная ими схема, однако, не получила дальнейшего развития из-за ряда конструктивных и технологических недостатков. Более совершенная конструкция была разработана В.А. Бирюковым и А.И. Ходорковским. Производственные испытания показали достаточную эффективность её использования при сушке мелких заготовок.

В зарубежной практике (Швейцария, Англия, Чехословакия, ФРГ, США, Канада) конвейерные ВЧ сушилки применяются, главным образом, для сушки ответственного и трудносохнущего материала различных пород. В Швейцарии и Чехословакии налажен централизованный серийный выпуск таких установок с широким диапазоном технических характеристик.

По литературным данным, нами даётся описание конструкций конвейерных сушилок, приводятся их технические характеристики и особенности применения, рекомендуемые параметры режимов сушки и параметры ВЧ генераторов.

Опыт работы различных ВЧ сушильных установок свидетельствует о том, что правильное, целевое их использование оказывается не только наиболее выгодным в отношении механизации, автоматизации и повышения культуры производства, но и экономически целесообразным.



Анализ осуществляющих работ показывает, что в настоящее время нет достаточных теоретических и экспериментальных обоснований по принципам построения оптимальных режимов скоростной ВЧ сушки с учётом всех определяющих её параметров (температура материала, градиент температуры, температура, влажность и скорость воздуха в камере), что объясняется как недостатком специальных исследований, так и стремлением зарубежных фирм охранять свои производственные секреты. Всё это затрудняет и сдерживает промышленное использование ВЧ способов сушки.

С учётом этого, в нашей работе проведено исследование влияния основных технологических и энергетических факторов на эффективность скоростной сушки коротких заготовок древесины некоторых пород, с разработкой конструкции высокочастотно-конвективной конвейерной сушильной установки и определением экономической целесообразности её промышленного внедрения.

Во второй главе приведено теоретическое обоснование оптимальных режимов высокочастотно-конвективной сушки.

Нагрев и сушка древесины в электрическом поле токов высокой частоты основаны на использовании тепла, выделяющегося в ней при помещении в конденсатор, через который проходит переменный электрический ток. Механизм высокочастотного нагрева представляет собой комплекс сложных физических явлений и, согласно существующих теорий диэлектриков, обусловлен преимущественно явлениями поляризации и частично проводимости. Общее количество энергии, выделяющееся в древесине в результате этих явлений, выражает мощность внутренних источников тепла в единице объёма материала и определяется формулой:

$$P = \omega \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2 \quad (I)$$

где  $\omega = 2\pi f$  - угловая частота переменного тока;

$f$  - частота электромагнитных колебаний, гц;

$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} = 8,854 \cdot 10^{-12}$  - электрическая постоянная, ф/м;

$c$  - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме, м/сек.;

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость материала;

$\operatorname{tg} \delta$  - тангенс угла потерь;

$E$  - напряжённость электрического поля, в/м.

На основании имеющихся формул и существующих теорий нагрева диэлектриков нами рассматриваются способы определения оптимальных параметров работы ВЧ оборудования (частота и напряжённость поля) в зависимости от типа сушилки и характеристики материала; приводится пример теоретической оценки важнейших параметров, определяющих процесс ВЧ сушки, что осо-



очень важно при проектировании таких установок.

Наиболее эффективные режимы ВЧ сушки могут быть обеспечены при комбинированных способах, сочетающих различные виды нагрева (ВЧ, конвективный, радиационный), что позволяет более действенно влиять на механизм продвижения влаги в древесине. На основании теоретических положений, разработанных виднейшими советскими учёными Ребиндером П.А., Лыковым А.В., Серговым П.С., Лебедевым П.Д., нами рассматриваются причины и закономерности термовлагопроводности в древесине с учётом важнейших факторов, определяющих процесс комбинированной сушки. Обобщая их, можно считать, что термовлагопроводность в древесине складывается из капиллярной термовлагопроводности, относительной неизоэнтальпической диффузии пара и жидкости и относительного неизотермического переноса воздуха и пара.

Основной закон переноса влаги в древесине при высокочастотной сушке обычно выражается в следующем виде:

$$i = -\alpha' \rho_0 \nabla u - \alpha' \rho_0 \delta \nabla t - K_p \nabla P \quad (2)$$

где  $i$  — плотность потока влаги, кг/м<sup>2</sup> сек.;  
 $\alpha'$  — коэффициент влагопроводности, м<sup>2</sup>/сек.;  
 $\rho_0$  — плотность древесины в абсолютно сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\nabla u$  — градиент влажности по сечению материала, 1/м;  
 $\delta$  — термоградиентный коэффициент, 1/град;  
 $\nabla t$  — градиент температуры, 1/м;  
 $K_p$  — коэффициент молярного переноса влаги,  $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{сек} \cdot \text{н/м}^2}$ ;  
 $\nabla P$  — градиент общего давления пара,  $\frac{\text{н/м}^2}{\text{м}}$ .

С учётом характера изменения и имеющихся численных значений коэффициентов тепло- и влагопереноса в нашей работе предпринимается попытка произвести относительную оценку интенсивности режимов ВЧ сушки и наметить область оптимальных значений режимных параметров.

Анализ основных закономерностей ВЧ сушки показывает, что определяющее влияние на интенсивность режима оказывает температура в центре материала. Наиболее экономичные режимы могут быть обеспечены при температуре материала не ниже 60°C и не выше 100°C, и температуре воздуха в камере в пределах 50–70°C, а наиболее скоростные, с учётом возможности конвейеризации процесса — при температурах материала выше 100°C и температуре воздуха ниже 50°C. Наиболее эффективным может явиться ступенчатый режим: в первом периоде сушка ведётся при высоких температурах в центре материала и воздуха в камере и малых градиентах температур, во втором — при более низких температурах воздуха и больших градиентах температур.

При выборе оптимальной влажности воздуха в сушилке важное значение имеет оценка связи между внутренним и внешним влагообменом. Теоретический



анализ показывает, что при комбинированной сушке на интенсивность режима оказывают влияние как внутренний, так и внешний влагообмен. На основании рассмотрения механизма процесса мы приходим к выводу о необходимости поддержания при низкотемпературных режимах ВЧК сушки по возможности более высокой влажности воздуха (вплоть до 100% в I-м периоде). Это подтверждается и опытом экспериментальных исследований различных авторов (Биржков В.А., Першанов Н.А., Бердинских И.П.) и производственным опытом. При режимах ВЧК сушки с температурой материала выше 100°C влияние влажности воздуха на эффективность процесса будет значительно меньшим, что объясняется высокой плотностью потока влаги в древесине, обусловленного градиентом и точечного давления. В связи с этим для сохранения качества материала и обеспечения высокой интенсивности сушки, необходимо поддерживать более высокую влажность воздуха при более высоких его температурах. Количественная оценка этого явления показывает, что для мягких режимов интенсивность внутреннего влагообмена оказывается выше наружного, что будет приводить к пересушке центральных слоёв материала и его растрескиванию. На опасность такого явления указывается в работах Сельгина Н.С. и Лжова А.В.

Анализ закономерностей изменения внутреннего и внешнего влагообмена позволяет сделать вывод о возможности построения таких высокотемпературных ВЧК режимов, для которых при высоком качестве сушки материала величина относительной влажности воздуха может не регулироваться. Такие режимы будут наиболее приемлемыми для конвейерных сушилок.

Наиболее сложным оказывается выбор необходимых скоростей воздуха при ВЧК сушке. Теоретическая оценка не позволяет наметить конкретных величин, требуемых скоростей для различных режимов и произвести сравнительную оценку относительной эффективности таких режимов. С учётом специфики ВЧК сушки и принимая во внимание результаты последних исследований для условий конвективной сушки (Пухов А.К.), считаем целесообразным принять скорость воздуха в пределах 1-2 м/сек., то есть обеспечить его обычную скоростную циркуляцию.

В третьей главе даётся описание методики и техники экспериментальных работ.

Экспериментальные исследования процесса высокочастотно-конвективной сушки включали следующие этапы: 1) разведывательные опыты, 2) поисковые исследования, 3) основные исследования.

В разведывательных опытах определялись способы измерения режимных и электрических параметров, регулирования и настройки ВЧ генератора, тепло-вентилярного оборудования и измерительных приборов.

В поисковых исследованиях изучалось влияние режимных параметров на продолжительность и качество сушки в широком диапазоне значений при малом количестве опытов (2-3 сушки на точку). Основной их целью было отыскание



конкретных значений режимных параметров для проведения основных исследований. Необходимое количество опытных сушек в основных исследованиях определено по общепринятым методикам, с учётом величины вариационного коэффициента для наиболее изменчивого из изучаемых факторов (перепад конечной влажности по сечению).

По результатам основных исследований, устанавливался оптимальный режим, для которого проводилось определение удельного расхода электроэнергии; определение эффективности сушки древесины различных пород: бука, граба, берёзы, ольхи и резонансовой ели; определение возможности одновременной сушки на конвейере древесины различных пород и с различной начальной влажностью, а также изучалось влияние скорости воздуха в камере на эффективность режима.

Значения исследуемых параметров и количество опытов приведены в "методической сетке" (табл. I).

Все исследования проводились на специально смонтированной нами экспериментальной установке. В качестве источника ВЧ энергии был использован ламповый генератор ЛГД-12, с колебательной мощностью 10 кВт и рабочей частотой 20-25 МГц.

Сушильная камера размером 1400x1000x1000 мм имела сварной герметический алюминиевый каркас с наружной теплоизоляцией. Камера была оборудована роторной вентиляторной установкой, позволявшей изменять скорость движения воздуха от 0 до 2,2 м/сек, трубчатыми электронагревателями общей мощностью 4 кВт и пропарочно-увлажнительной системой с мощностью испарителей 3 кВт. Рабочий конденсатор состоял из 3-х горизонтальных алюминиевых электродных пластин размером 1000x600x4 мм. Средний электрод являлся высокопотенциальным и был закреплён неподвижно. Верхний и нижний, - низкопотенциальные, - регулировались по высоте.

Для устранения неравномерности нагрева материала потребовалась установка в рабочем конденсаторе компенсирующих индуктивностей. Нами приводится подробная методика и пример расчёта их параметров.

Измерение температуры и влажности воздуха в камере осуществлялось с помощью психрометров, составленных из спиртовых термометров СП-2 (ГОСТ 9177-59). Для записи режимных параметров использовался самопишущий манометрический термометр ТСГ-720 (ГОСТ 8624-54) с пределом измерений 0-120°C. Длительная эксплуатация показала хорошую надёжность и достаточную точность его работы в ВЧ сушилке. Скорость воздуха измерялась крыльчатым анемометром.

Температура древесины измерялась спиртовыми термометрами СП-2, короткими (35-40 мм) хромель-алюминиевыми термопарами и термометром сопротивления с термистером ИТ-54. В процессе разведывательных опытов были проведены сравнительные испытания и тарировка всех используемых приборов, что позволило избежать ошибок при последующих измерениях. Все измерения электрическими приборами производились только при отключении ВЧ поля. Наиболее удоб-



## МЕТОДИЧЕСКАЯ СЕТКА

		ПОИСКОВЫЕ		ИССЛЕДОВАНИЯ					
		размером	заготовки	1,2	2-3	6-9	5		
Буковые	60x60x800 мм	75	30	100; 85 не регулируется	1,2	2-3	6-9	5	45
		90	30	100 не регулируется	1,2	2-3	4-6	5	30
			50		1,2	2-3	4-6	5	30
			70		1,2	2-3	4-6	5	30
		95	30	100; 85 не регулируется	1,2	2-3	6-9	5	45
			50		1,2	2-3	6-9	5	45
			70		1,2	2-3	6-9	5	45
		100	30	не регулируется	1,2	3	3	7	21
			50		1,2	3	3	7	21
			70		1,2	3	3	7	21
			90		1,2	3	3	7	21
		105	30	100; 85 не регулируется	1,2	2-3	6-9	7	63
			50		1,2	2-3	6-9	7	63
			70		1,2	2-3	6-9	7	63
			90		1,2	2-3	6-9	7	63
		110	30	не регулируется	1,2	2-3	2-3	7	21
			50		1,2	2-3	2-3	7	21
			70		1,2	2-3	2-3	7	21
			90		1,2	2-3	2-3	7	21
			100		1,2	2-3	2-3	7	21
			105		1,2	2-3	2-3	7	21
		120	30	не регулируется	1,2	2-3	2-3	5	15
			50		1,2	2-3	2-3	5	15
			70		1,2	2-3	2-3	5	15
90			1,2	2-3	2-3	5	15		
100			1,2	2-3	2-3	5	15		
110			1,2	2-3	2-3	5	15		
		ОСНОВНЫЕ		ИССЛЕДОВАНИЯ					
		30	не регулируется	1,2	12	12	5	60	
		50		1,2	12	12	5	60	
		105	70		1,2	12	21	7	147
			90		1,2	12	12	7	84
		100	70		1,2	12	12	7	84
			70		0	3	3	7	21
			70		2,1	3	3	7	21
Граб, 60x60x800 мм	105	70	не регул.	1,2	6	6	5	30	
Берёза, 60x80x1000	105	70	не регул.	1,2	15	15	5	75	
Ольха, 60x80x800	105	70	не регул.	1,2	6	6	5	30	
Ель, 70x100x700	105	70	не регул.	1,2	3	3	5	15	

Примечание: проведено сушек - 192  
просушено образцов - 1220



ным прибором, обеспечивающим хорошую точность измерений как в центре, так и на поверхности древесины, оказался термометр сопротивления.

Измерение расхода электроэнергии и регистрация мощности, потребляемой ВЧ генератором производились с помощью 3-х фазного счётчика СМ4У-И672М и самопишущего ваттметра Н 354. Напряжение в рабочем конденсаторе измерялось ламповым вольтметром ИКС-7Б с делителем напряжения ДНЕ-2 и электростатическим киловольтметром С-96. Рабочая частота ВЧ генератора контролировалась кварцевым гетеродинным волномером типа 527.

Все основные исследования проводились на буковых заготовках размером 60x60x800 мм, при средней начальной влажности 60%. Определение влажности древесины в процессе сушки производилось весовым способом по общепринятым методикам через каждые 15 минут. Во всех случаях определялись влажность и перепад влажности по сечению в середине (1/2 длины) и торце (25 мм от торца) заготовки, что обуславливалось более интенсивной сушкой торцов, а также велся контроль внутренних напряжений по силовым секциям. Для контроля влажности и качества материала в каждой опытной сушке использовалось 5-7 заготовок. Одна из них, с заделанными термометрами и термопарами, являлась контрольной и из камеры не вынималась до окончания сушки, а остальные были рабочими и по мере необходимости использовались для контроля влажности и вырезки образцов.

В четвёртой главе излагаются результаты экспериментального исследования.

#### 1. Поисковые исследования

Результаты поисковых исследований показали, что при температурах материала ниже 100°C не удаётся обеспечить скоростных эффективных режимов сушки с учётом возможности её конвейеризации как из условия продолжительности процесса, так и качества материала (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2

Результаты сушки буковых заготовок размером 60x60x800 мм при низкотемпературных режимах

№ пп	Температура древесины		Параметры воздуха		Перепад температуры	Продолжительность сушки, час	Примечание
	$t_г$	$t_п$	$t_с$	$\varphi$			
1	75	56	31	45	19	24	Влажность воздуха не регулировалась
	75	60	50	26	19	26	
	75	72	70	33	3	35	
2	90	63	33	57	27	18	
3	90	76	50	50	14	17	
4	90	80	70	42	10	23	
5	95	81	34	53	14	6,4	
6	95	86	50	43	9	9,6	
7	95	90	70	37	5	12	

## II

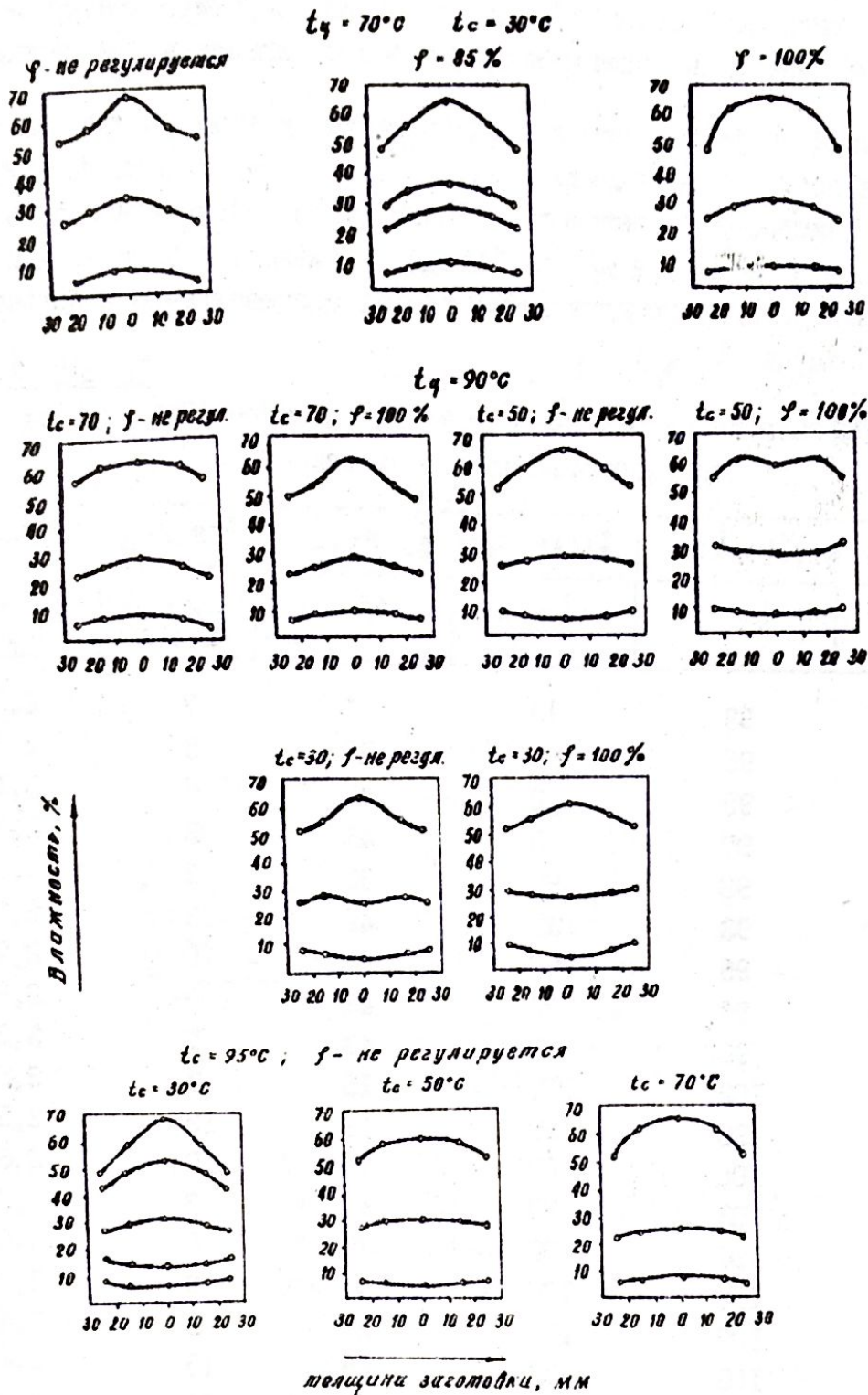


Рис. I. Характер изменения послойной влажности буковых заготовок размером 60 x 60 x 800 мм в зависимости от режима сушки.  
Скорость воздуха - 1,2 м/сек.



Для большинства исследованных режимов характерной особенностью явилось поверхностное растрескивание высушиваемого материала, которое не удалось устранить ни повышением влажности воздуха (вплоть до 100%), ни промежуточными термовлагообработками. Это подтвердило теоретические опасения по поводу возможной пересушки поверхностных слоёв материала в I-м периоде сушки.

Гораздо более эффективными оказались режимы с температурой материала выше 100°C. Для всех исследованных значений температур материала величина градиентов температуры изменяется очень мало (табл. 3) даже при сильном изменении температуры воздуха в камере. Продолжительность сушки хотя и зависит от параметров режима, но изменяется весьма незначительно в большом диапазоне значений  $t_4$  и  $t_c$ .

Таблица 3

Результаты сушки буковых заготовок размером 60x60x800 мм при высокотемпературных режимах

№№ п/п	ТЕМПЕРАТУРА ДРЕВЕСИНЫ		ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУХА		ПЕРЕПАД ТЕМПЕРА- ТУРЫ В МА- ТЕРИАЛЕ	ПРОДОЛЖИ- ТЕЛЬНОСТЬ СУШКИ, ЧАС
	$t_4$	$t_n$	$t_c$	$\varphi$		
1	100	93	32	51	7	2,5
2	100	95	50	39	5	2,8
3	100	95	70	42	5	3,1
4	100	97	90	43	3	2,7
5	100	98	95	35	2	3,15
6	100	98	42	42	12	2,7
7	105	93	33	42	10	2,7
8	105	95	50	36	10	2,9
9	105	96	70	42	9	2,9
10	105	98	90	43	7	3,2
11	105	98	90	43	7	3,2
12	105	102	100	15	3	2,8
13	110	98	35	49	12	2,55
14	110	100	50	43	10	2,6
15	110	100	70	35	7	2,9
16	110	103	90	43	6	2,4
17	110	104	90	43	6	2,75
18	110	104	100	43	6	2,4
19	110	107	105	25	3	2,4
20	120	105	36	65	15	2,4
21	120	106	50	39	14	2,25
22	120	107	70	34	13	2,5
23	120	107	70	34	13	2,5
24	120	109	100	36	11	2,3
25	120	115	100	38	5	2,5

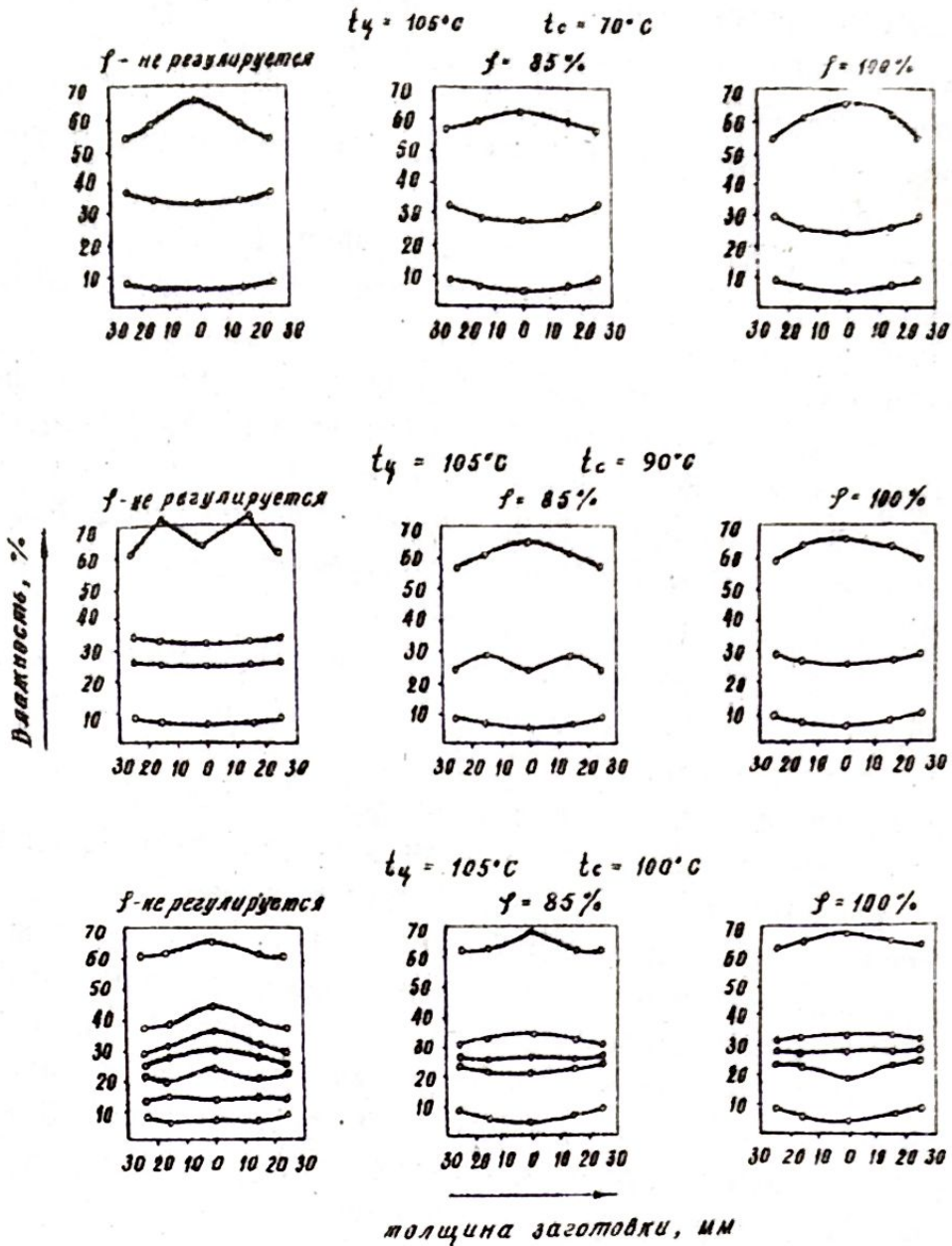


Рис. I а. Характер изменения послойной влажности буковых заготовок размером 60 x 60 x 800 мм в зависимости от режима сушки.  
Скорость воздуха - 1,2 м/сек.



Анализ полойной влажности показывает, что снижение температуры воздуха в сушилке и повышение её влажности приводит к увеличению перепада и ухудшению качества сушки. Однако при температурах воздуха 90–100°C и низкой его влажности наблюдается пересушка поверхностных слоёв и даже образование мелких поверхностных трещин. Это свидетельствует о наличии оптимального соотношения режимных параметров, позволяющего получить наиболее эффективные режимы.

Для большинства высокотемпературных режимов было получено высокое качество материала при малых перепадах влажности по сечению в отсутствие внутренних напряжений.

Оценка относительной интенсивности различных режимов показывает, что увеличение температуры материала выше 105°C не даёт ощутимых преимуществ, поэтому для проведения дальнейших исследований мы сочли целесообразным принять её равной 105°C. Это позволит иметь гарантированное поддержание температуры материала выше 100°C в производственных условиях, где точность регулирования обычно не превышает 2–3°C.

Выбор оптимальных значений температуры воздуха в камере оказался более затруднительным, поэтому в основных исследованиях были проведены опытные сушки при температурах: 30, 50, 70, 90, 100°C.

Влияние влажности воздуха становится заметным только при её значениях близких к 100%, причём для большинства режимов оно отрицательное, поэтому в основных исследованиях её величина не регулировалась.

В процессе поисковых исследований было установлено, что при высокотемпературных режимах важное влияние на эффективность режима оказывает продолжительность начального прогрева материала до температуры 90–95°C. Для обеспечения качественной сушки буковых заготовок она не должна превышать 1 часа. Необходимая удельная мощность по ВЧ при этом должна быть 0,5–1 Вт/см<sup>3</sup>. Во 2-м периоде, когда затраты тепла на испарение влаги сокращаются, она может быть снижена до 0,3–0,5 Вт/см<sup>3</sup>.

## II. Основные исследования

При проведении основных исследований была выяснена возможность поддержания и регулирования заданных режимных параметров; определено влияние температуры воздуха в камере на продолжительность процесса, качество высушиваемого материала и расход электроэнергии; установлены зависимости изменений электрических параметров работы ВЧ генератора от средней влажности материала в процессе сушки.

Результаты сушек по каждому из исследованных режимов, полученные на основании статистической обработки экспериментальных данных, приведены в таблице 4, а кинетика процесса представлена на рисунке 2.

Анализ полученных кривых показывает, что кинетика ВЧК сушки не имеет существенных отличий от других способов. Характер изменения кривой сушки тесно связан с величиной температуры воздуха в камере, определяющей тем-



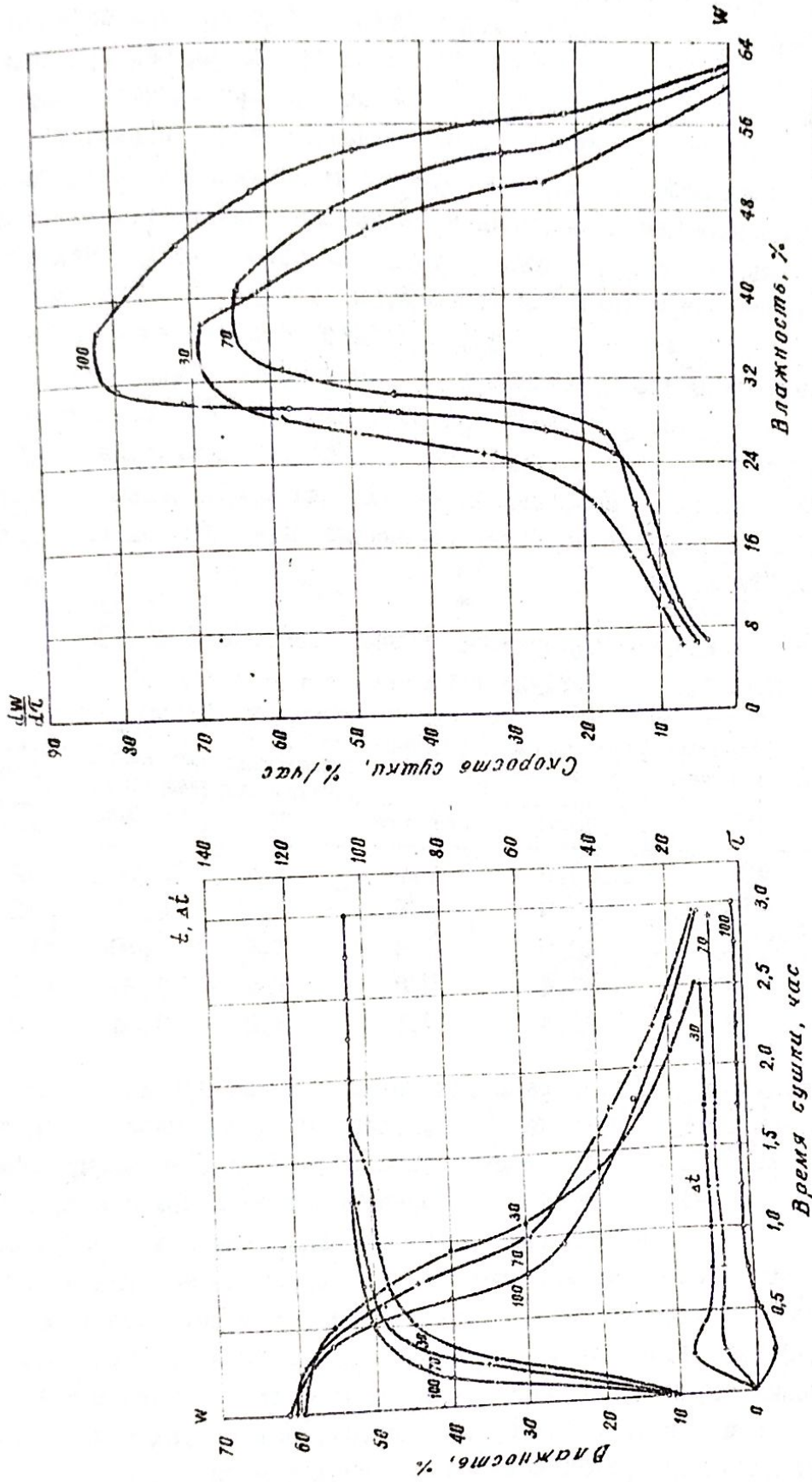


Рис. 2. Кривые сушки, скорости сушки и температурные кривые бумажных заготовок размером 60 x 60 x 800 мм в зависимости от температуры воздуха в камере.  
 Режим сушки: температура воздуха — 30, 70, 100 С, температура в центре материала — 105 С, скорость воздуха — 1,2 м/сек., влажность воздуха — не регулируется.



температурный градиент. Повышение температуры воздуха способствует более быстрому начальному прогреву материала и сокращает первый период сушки. Большой же градиент температуры, при низких температурах воздуха, заметнее проявляется во втором периоде (при низкой влажности материала падает градиент избыточного давления), что приводит к общему сокращению продолжительности сушки при таких режимах. Исходя из этого, можно сделать вывод о верности теоретического предположения Лебедева П.Д. о совместном влиянии на интенсивность сушки и градиента избыточного давления и градиента температуры, хотя абсолютная величина самого градиента температуры, изменяется весьма незначительно, с 3 до 5 град/см – при снижении температуры воздуха с 90° до 30°С. Совместное действие градиентов температуры и избыточного давления обеспечивает более высокую интенсивность внутреннего движения влаги в древесине по сравнению с интенсивностью поверхностной влагоотдачи на всём протяжении сушки для большинства исследованных режимов, что приводит к пересушке её центральных слоёв (рис.3). Величина перепада влажности для определённой температуры в центре материала и скорости воздуха однозначно определяется значением температуры воздуха (табл. 4).

Таблица 4

Результаты опытных сушек буковых заготовок размером 60x60x800 мм при различных температурах воздуха в камере (средние значения) = 105°С

Температура воздуха, °С	Продолжительность сушки, час	Средняя влажность материала, %		Перепад влажности по сечению, %	Расход электроэнергии, квт ч/кг исп. влаги	Количество сушек, шт
		начальная	конечная			
30	2,52	60,0	6,4	3,9	5,00	12
50	2,70	60,0	6,8	2,9	4,65	12
70	2,98	60,0	6,6	2,4	4,40	12
90	2,97	63,4	7,8	1,9	3,73	12
100	2,91	61,4	7,1	1,8	3,64	12

Несколько отличный характер развития полей температуры и влажности наблюдается при температуре воздуха 100°С. Здесь в первом периоде высокая температура и низкая влажность воздуха способствуют интенсивному поверхностному испарению, что приводит к пересушке поверхностных слоёв. При снижении их влажности за предел гигроскопичности интенсивность поверхностного испарения падает. К этому времени температура в центре материала поднимается выше 100°С и плотность потока влаги в древесине возрастает за счёт совместного действия градиентов избыточного давления и температуры. Это приводит к изменению характера распределения влажности по сечению материала и вызывает пересыхание центральных слоёв (рис.3). Малые градиенты температуры (1 град/см) являются причиной заметного снижения скорости сушки во 2-м периоде, по сравнению с режимами с более низкими температурами воздуха (рис.2).

Главным критерием пригодности исследуемых режимов служило соответствие



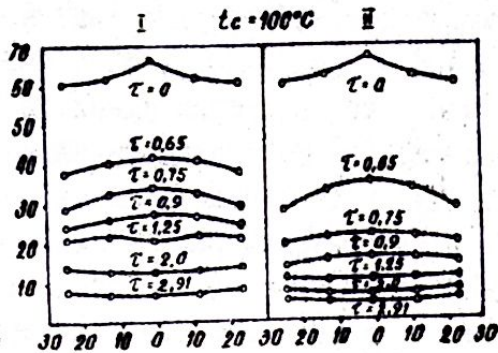
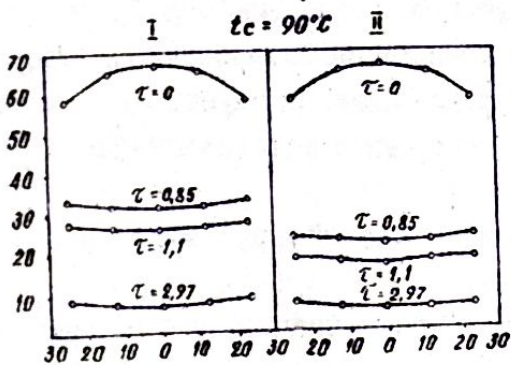
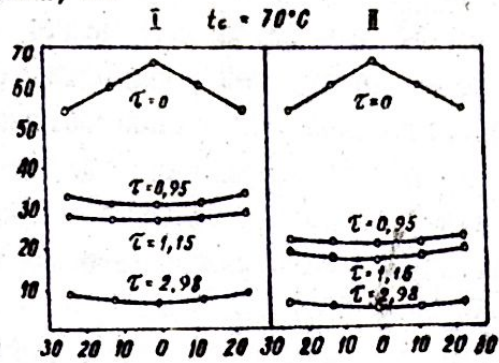
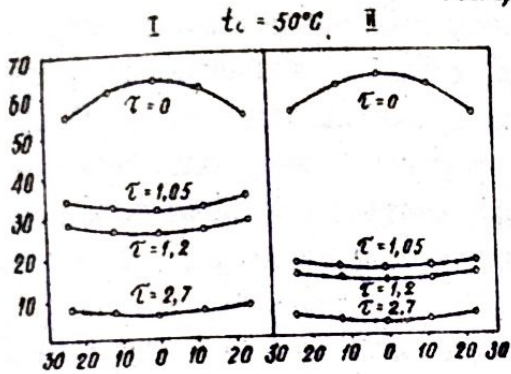
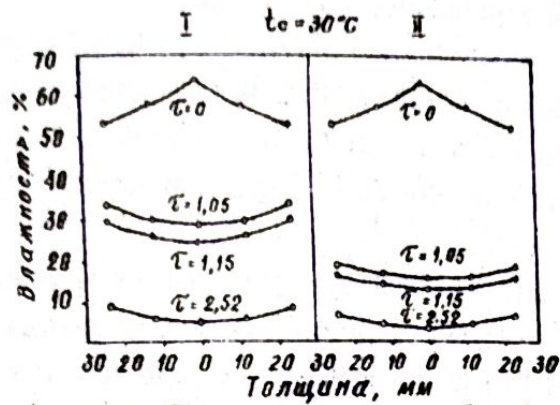


Рис. 3. Распределение влажности по толщине буковых заготовок размером 60 x 60 x 800 мм в зависимости от температуры воздуха в камере.

Температура в центре материала    - 105°C  
 Скорость воздуха в камере        - 1,2 м/сек.  
 Влажность воздуха                    - не регулируется.

I - середина заготовки  
 II - на расстоянии 25 мм от торца.

2274 ар.

Б-ка БТИ им. С. М. Кирова  
г. Минск, Свердлова, 13



качества сушки материала нормативным требованиям.

Значения перепадов влажности в зависимости от температуры воздуха в камере, полученные на основании статистической обработки опытных данных (таблица 4), показывают, что для обеспечения 1-й категории качества сушки температура воздуха должна быть около  $70^{\circ}\text{C}$ , для 2-й категории -  $50^{\circ}\text{C}$ , для 3-й и ниже - может не регулироваться.

Важной особенностью режимов с температурой воздуха ниже  $100^{\circ}\text{C}$  явилось отсутствие внутренних напряжений в высушиваемом материале. Это можно объяснить быстрым протеканием процесса изменения влажности и отсутствием больших градиентов влажности, в результате чего влажностные напряжения, возникающие при переходе средней влажности критического значения, не успевают перерасти в остаточные, чему способствует также влияние ТВЧ на ускорение релаксации внутренних напряжений. Для этих режимов нами были отмечены лишь единичные случаи (6 из 300 образцов) продольного и поперечного коробления. Все они были обусловлены наличием больших сучков и косослоя, не соответствующих требованиям ГОСТ 7897-62.

При температурах воздуха  $100^{\circ}\text{C}$  и частично  $90^{\circ}\text{C}$  до 20% от просушенных заготовок имели мелкие поверхностные и торцовые трещины (глубиной до 2-х мм) и около 40% - продольное и особенно поперечное коробление. Хотя в большинстве случаев эти заготовки имели до сушки явно недопустимые дефекты (косослой, завитки, сучки), однако увеличение брака свидетельствует о снижении качества сушки при таких режимах.

При всех исследованных режимах заготовки с зоной ярко выраженного ложного ядра качественной сушке не поддаются.

Исследование зависимости величины среднеквадратического отклонения конечной влажности от средней влажности материала (в интервале 5-25%) показывает, что между ними имеется линейная зависимость. Для различных значений температуры воздуха в камере она характеризуется следующими данными:

- а) при  $t_c = 30^{\circ}\text{C}$  -  $z = 0,87$  ;  $m_z = 0,08$  ;  $\frac{z}{m_z} = 11 > 4$  ;  
 $\sigma = 0,16W - 0,32$  ;
- б) при  $t_c = 70^{\circ}\text{C}$  -  $z = 0,84$  ;  $m_z = 0,1$  ;  $\frac{z}{m_z} = 8,4 > 4$  ;  
 $\sigma = 0,152W - 0,39$  ;
- в) при  $t_c = 100^{\circ}\text{C}$  -  $z = 0,82$  ;  $m_z = 0,1$  ;  $\frac{z}{m_z} = 8,2 > 4$  ;  
 $\sigma = 0,069W + 0,1$  ;

Оценка результатов опытных сушек показывает, что оптимальной является температура воздуха в сушилке около  $70^{\circ}\text{C}$ . При более низких её значениях происходит снижение качества материала из-за увеличения перепадов влажности по сечению, при более высоких - из-за появления коробления и поверхностных трещин. Общее количество брака при сушке по такому режиму составило в наших опытах около 6%, по всем видам, а брак "по сушке" не превысил 4%, включая сюда и заготовки с ложным ядром.



Последование влияния неравномерности начальной влажности на результаты сушки (величина неравномерности начальной влажности в одной загрузке составляла до 40%) показало, что более влажные заготовки, имеющие больший фактор потерь, поглощают больше ВЧ энергии, в результате чего относительная интенсивность их сушки остаётся выше, чем более сухих на всём протяжении сушки. В конечном итоге это приводит к выравниванию средней влажности различных заготовок и при её значении 6% отклонение влажности отдельных заготовок от среднего значения составляет около 2%, что соответствует нормативным требованиям.

Важными показателями эффективности различных режимов являлся удельный расход электроэнергии и изменение основных электрических параметров установки в процессе сушки. Трудности непрерывной регистрации всех режимных параметров ВЧ генератора не позволяют оценить влияние различных режимов сушки на условия его работы, поэтому отметим лишь общие закономерности, характерные для всех режимов.

Среднее значение мощности, потребляемой генератором из сети, изменялось в процессе сушки от 9 до 7 квт, что, естественно, снижает КПД установки и приводит к удорожанию процесса. Среднее значение напряжения на пластинах рабочего конденсатора изменялось от 5 до 4,5 кв и полностью согласуется с изменением мощности, потребляемой из сети. Среднее изменение (повышение) частоты в процессе сушек составило около 0,5 Мгц при рабочих значениях — 22-24 Мгц. Можно отметить затруднение настройки ВЧ генератора при высокой влажности воздуха в камере и частые срывы колебаний, обусловленные электрическим пробоем воздуха.

Приведенные результаты подтверждают низкую эффективность использования ВЧ оборудования коротковолнового диапазона для камер периодического действия, обусловленную характером изменения параметров загрузки рабочего конденсатора и условиями его настройки, не позволяющими обеспечить высокие КПД.

В наших экспериментальных сушках все эти явления ещё более осложнились из-за необходимости работы при низких анодных напряжениях (на 3-х тиратронах), что не позволило получить точных данных по величине удельных расходов электроэнергии в зависимости от значений, исследуемых режимных параметров. Полученные нами данные позволяют произвести лишь сравнительную оценку эффективности этих режимов (табл. 5).

Как видно из таблицы, повышение температуры воздуха в камере, как и следовало ожидать, приводит к снижению расхода электроэнергии. Зависимость удельного расхода электроэнергии от температуры воздуха сохраняется на всём протяжении сушки, однако при низких значениях влажности материала она выражена более отчётливо. При всех температурах воздуха, средняя величина удельного расхода электроэнергии на удаление свободной влаги в 2-2,5 раза меньше, чем на удаление связанной. А так как эффективность использования



высоких температур особенно заметно именно при низких влажностях материала, то для условий камерной сушки оледует стремиться к ступенчатому режиму, позволяющим сочетать качественную сушку материала со снижением расхода электроэнергии.

Таблица 5

Влияние температуры воздуха в камере на величину удельного расхода электроэнергии при сушке буковых заготовок размером 60x60x800 мм

Температура воздуха в сушилке, °C					
30		70		100	
Влажность материала, %	Расход электроэнергии кВт·ч/кг исп. влаги	Влажность материала, %	Расход электроэнергии кВт·ч/кг исп. влаги	Влажность материала, %	Расход электроэнергии кВт·ч/кг исп. влаги
60-40	2,14	60-40	2,0	60-40	1,9
40-30	2,6	40-30	2,1	40-30	2,0
30-20	4,3	30-25	2,2	30-25	2,5
20-10	5,6	25-20	4,1	25-20	3,6
10-6	6,1	20-15	4,8	20-10	3,9
		15-10	5,4	10-6	4,3
		10-6	5,7		
		<u>Средний</u>			
60-6	5,0	60-6	4,4	60-6	3,64
60-30	2,34	60-30	2,13	60-30	1,96
30-6	5,9	30-6	5,0	30-6	4,1

Абсолютные значения удельных расходов электроэнергии, полученные нами в процессе исследований для оптимального режима составили:

1. На экспериментальной установке БТИ, при сушке буковых заготовок размером 60x60x800 мм до 7% - 3,1 кВт·ч/кг испаряемой влаги.

2. На промышленной установке Борисовской фабрики пианино (камера периодическая, генератор ГС-48) при сушке буковых заготовок размером 65x60x1450 мм от 60 до 8% - 2,5-2,75 кВт·ч/кг испаряемой влаги.

При конвейерной сушке с использованием ВЧ генераторов коротковолнового диапазона эти значения будут несомненно более низкими.

Проведенное нами разведывательное исследование по выяснению влияния скорости воздуха на эффективность режима показало, что во всём интервале увеличения скорости воздуха от 0 до 2,1 м/сек. наблюдается снижение продолжительности сушки, перепада влажности по сечению материала и расхода электроэнергии (табл. 6).

Таблица 6

Влияние скорости воздуха на результаты ВЧК сушки

N п/п	Скорость воздуха, м/сек	Продолжит. сушки, час	Средняя влажность заготовок		Перепад конечной влажности, %	Расход электроэнергии кВт·ч/кг исп. влаги
			начальная	конечная		
1.	0	3,3	58,6	7,1	2,8	4,48
2.	1,2	2,98	60,7	6,6	2,4	4,40
3.	2,1	2,80	59,7	7,4	2,1	3,76



Большой объём работы не позволил нам провести более подробного исследования, чтобы установить оптимальные значения скорости воздуха в сушилке, однако с учётом полученных данных, можно отметить, что для режимов ВЧК сушки, она должна быть не менее 2 м/сек.

Для выяснения эффективности сушки древесины различных пород по оптимальному режиму нами было проведено специальное исследование. Высушивались заготовки граба, берёзы, ольхи размером 60x60x800 мм и резонансовой ели размером 70x100x700 мм. По результатам статистической обработки экспериментальных данных составлена таблица 7 и построены графики кинетики процесса (рис. 4).

Таблица 7

Результаты опытных сушек древесины различных пород

№ п.п.	Порода	Продолжительность сушки, час	Средняя влажность материала, %		Перепад конечной влажности	Расход электроэнергии квт·ч/кг исп. влаги
			начальная	конечная		
1.	Б у к	2,98	60,7	6,6	2,4	4,4
2.	Берёза	3,2	63,9	7,1	2,4	3,15
3.	Г р а б	3,1	58,6	7,5	1,6	4,7
4.	Ольха	3,3	64,6	7,6	2,6	3,4
5.	Е л ь	2,2	67,4	7,6	2,0	2,9

Полученные результаты можно объяснить при совместном анализе кинетики процесса для различных пород. Известно, что фактор потерь древесины увеличивается с увеличением её плотности и чем больше её значение, тем интенсивнее происходит начальный прогрев материала. Из рис. 4 видно, что в I-м периоде сушки температурные кривые и кривые сушки располагаются в соответствии со средним значением плотности древесины. В то же время более плотная древесина обычно сохнет хуже из-за меньшей влагопроводности, поэтому при достижении одинаковых значений температур, скорость сушки у менее плотных пород становится выше, чем у более плотных. В наших опытах из-за малой величины удельной мощности это проявляется только во 2-м периоде. При более высоких её значениях может оказаться, что менее плотная древесина будет сохнуть значительно быстрее. Вместе с тем, для производства более важна именно одинаковая продолжительность сушки различных пород, что позволит в случае необходимости не производить их дополнительной сортировки перед сушкой.

Не менее важным является высокое качество сушки всех исследованных нами пород, причём в отличие от буковых, берёзовых и ольховых заготовки с ложным ядром и внутренней гнилью не имели дефектов сушки. Внутренние напряжения и коробление заготовок отмечено лишь в единичных случаях.

По результатам экспериментальных исследований, нами произведена количественная оценка балансов потерь влаги, обусловленных различными гради-







ентами, из основного уравнения (2) и определены ориентировочные значения некоторых коэффициентов влагопереноса по методике профессора Лебедева Н.Д. Результаты этих расчётов приведены в таблице 8.

Таблица 8

Ориентировочные значения коэффициентов влагопереноса при высокотемпературных режимах ВЧК сушки

ВРЕМЯ СУШКИ, ЧАС.	ТЕМПЕРАТУРА В ЦЕНТРЕ МАТЕРИАЛА, °С	ВЛАЖНОСТЬ МАТЕРИАЛА, %	КОЭФ. МОЛЯРНОГО ПЕРЕНОСА ПАРА $K_p \cdot 10^2$	ВРЕМЯ СУШКИ, ЧАС.	ТЕМПЕРАТУРА В ЦЕНТРЕ МАТЕРИАЛА, °С	ВЛАЖНОСТЬ МАТЕРИАЛА, %	ТЕРМОГРАДИЕНТНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ, $1/°С$
0,35	96	55	11,2	1,15	99	25	1,05
0,5	100	50	14,9	1,35	100	20	0,36
0,62	100	45	16,5	1,65	104	15	0,24
0,68	101	40	16,8	2,1	105	10	0,156
0,71	101	35	16,5	2,5	105	7	0,07
0,75	102	30	16,3				
0,9	104	25	3,86				
1,3	105	20	3,55				
1,75	105	15	3,6				
2,25	105	10	3,9				
2,9	105	7	3,2				

На основании полученных значений коэффициента молярного переноса пара, предпринята попытка установить порядок изменения критерия Лыкова в процессе ВЧК сушки по высокотемпературным режимам. Проведенный расчёт показал, что порядок этого изменения составляет от 9000–10000 в первом периоде при средней влажности материала 40–50%, до 700–1000 во 2-м периоде при влажности материала 8–10%. Несмотря на весьма приближенный характер такого расчёта, величина полученных значений коэффициентов и критериев переноса неплохо согласуется с данными их прямого экспериментального определения, проводимых в работах Миронова В.П. и Максимова Г.А.

В пятой главе излагаются результаты экспериментальных исследований и конструктивных разработок по конвейеризации высокочастотно-конвективной сушки.

Для оптимального режима, полученного в процессе основных исследований, нами разработаны некоторые способы и технологические приёмы конвейерной сушки коротких заготовок, проведены исследования по установлению возможности и целесообразности сушки коротких тонких заготовок в стопе по несколько штук с прокладками и без прокладок и заготовок большого сечения.

Полученные результаты показывают, что увеличение ширины буковых заготовок в 2–3 раза приводит лишь к незначительному (10–15%) увеличению продолжительности сушки и не влияет на остальные качественные показатели. Результаты сушки берёзовых сердцевых заготовок приведены в таблице 9.



Результаты сушки берёзовых заготовок

N n/p	Размер заготовок, мм			Средняя влажность, %		Количество заготовок, шт	Продолжительность сушки, час	Расход электроэнергии квт·ч/кг исп. влаги
	Т	Ш	Д	начальная	конечная			
1	110	130	600	84	10	2	3,4	2,9
2	110	170	1000	72	9	2	5,2	3,1
3	135	180	1000	65	12	1	7,3	4,3
4	110	170	1000	70	11	2	3,0	1,8
5	110	210	1000	76	10	2	3,5	2,2
6	110	170	1000	68	14	2	2,4	1,6
7	110	180	1000	57	11	2	3,1	2,6
8	135	250	1000	63	8	1	2,9	2,0
9	135	180	1000	66	9	1	2,6	3,1
10	135	200	1000	80	12	1	2,6	2,8

В первых 3-х сушках удельная ВЧ мощность составляла 0,15-0,2 вт/см<sup>3</sup>, в остальных - 0,2-0,3 вт/см<sup>3</sup>.

Перепады влажности по сечению во всех случаях не превысили 5%, а заготовки не имели существенных дефектов.

На основании полученных результатов, можно рекомендовать, в случае обширной спецификации заготовок, подлежащих сушке, и большого количества тонких заготовок, производить их сушку в кратных размерах, что позволит повысить качество материала и увеличить его полезный выход.

Результаты поисковых опытов, по отработке технологических приёмов сушки коротких, широких заготовок резонансовой ели, свидетельствуют о возможности использования для неё тех же режимов, что и для бука.

Проведенные исследования позволили нам разработать схему ВЧК конвейерной сушилки и рассчитать её технологические и конструктивные параметры, на основании этого, при нашем участии, выполнен рабочий проект такой установки.

Установка СЖ-4 состоит из четырёх ламповых генераторов ДД-10 (колебательная мощность 40 квт) и сушильной камеры. Камера - проходная, туннельного типа, собирается из 4-х секций (по числу генераторов) и имеет длину 10 м. В каждой секции располагаются два электрода рабочего конденсатора, верхний - высокопотенциальный электрод, может регулироваться по высоте в пределах 50-150 мм, для осуществления требуемой настройки.

Перемещение материала осуществляется ленточным конвейером, скорость которого изменяется в пределах 1,44-3,5 м/час. Способ укладки заготовок - поперечный, максимальная их длина - 800 мм.

Для осуществления комбинированных режимов сушки камера оборудована блоком трубчатых электронагревателей, мощностью 8 квт, и центробежным вентилятором ДЭ-70.



Производительность такой установки составит:

- при сушке бука от 60 до 8% - 0,56 м<sup>3</sup> в смену;  
при сушке ели от 40 до 8% - 2,05 м<sup>3</sup> в смену.

В шестой главе дается расчёт экономической эффективности использования высокочастотно-конвективных конвейерных установок для сушки древесины.

Здесь нами проведены: анализ технических, технологических и экономических факторов, определяющих эффективность сушки, расчёт величины капитальных вложений, необходимых для внедрения установок СКВ-4 с учётом преискурантной стоимости оборудования и затрат на строительство, подробный расчёт себестоимости ВЧК сушки заготовок.

С учётом полученных данных, на основании типовых методик, определена экономическая эффективность внедрения ВЧК конвейерных сушилок на Молодечненской фабрике музыкальных инструментов и проведена сравнительная оценка эффективности проектных вариантов ВЧК и паровой сушилки для условий Белоруссии и районов с дешёвой электроэнергией (табл. 10). Таблица 10

Экономическая эффективность сравниваемых вариантов

№ № п п	НАИМЕНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ	Д А Н Н ы Е			
		ДЕЙСТВУЮЩИХ ПАРОВЫХ СУШИЛОК	ВЧК СУШИЛОК (БССР)	ДЛЯ ПАРОВЫХ СУШИЛОК	ДЛЯ ВЧК СУШИЛОК В РАЙОНАХ С ДЕШЕВОЙ ЭЛ-ЭН.
1.	Годовой объём высушиваемого материала, м <sup>3</sup>	2100	2100	2100	2100
	в том числе: а) бук, м <sup>3</sup>	1300	1300	1300	1300
	б) ель, м <sup>3</sup>	800	800	800	800
2.	Капитальные вложения, тыс.руб.	30,337	66,0	48,600	13,706
3.	Дополнительные капитальные вложения, тыс.руб.	-	29,868	34,894	-
4.	Себестоимость сушки:				
	а) 1 м <sup>3</sup> заготовок, руб.	28,54	21,15	11,2	13,18
	б) на годовую программу, тыс.руб.	59,942	44,415	23,520	27,678
5.	Годовая экономия, тыс.руб.	-	36,259	4,158	-
6.	Срок окупаемости дополнительных капиталовложений, Т.лет	-	1,1	8,7	-
7.	Коэффициент сравнительной экономической эффективности, Е	-	0,91	0,15	-

Из приведенных данных видно, что внедрение ВЧК сушилок СКВ-4 на Молодечненской фабрике музыкальных инструментов взамен действующих паровых камер даёт значительный экономический эффект.

Сравнение проектных вариантов показывает большую эффективность паровых камер для центральных районов страны, а ВЧК - для районов с дешёвой электроэнергией (Иркутск-Красноярск-Братск-энерго и др.), где имеются большие лесные запасы и намечается широкое развитие лесной и деревообрабатывающей промышленности.



## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования факторов, влияющих на улучшение технологии и эффективность скоростной сушки коротких заготовок древесины различных пород в электрическом поле высокой частоты, позволяют сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Наибольшее влияние на эффективность режима ВЧ сушки оказывает температура в центре древесины. При низких её значениях ( $70-90^{\circ}\text{C}$ ) наибольший возможный градиент температуры не обеспечивает таких ускорений, как минимальные градиенты при температурах  $95-105^{\circ}\text{C}$ .

2. Для обеспечения скоростных режимов сушки, с учётом возможности её конвективизации, температура в центре материала должна быть не ниже  $100^{\circ}\text{C}$ .

3. Аналитический расчёт баланса потоков влаги, проведенный на основе экспериментальных данных, показал, что определяющее влияние на интенсивность высокотемпературного режима оказывает градиент избыточного давления. Влияние градиента температуры становится заметным только при самых больших его значениях, которые удаётся обеспечить (перепад температуры по сечению материала -  $15-20^{\circ}\text{C}$ ).

Плотность потока влаги в древесине, обусловленного градиентом избыточного давления, оказывается на 1-2 порядка выше, чем обусловленного градиентом температуры и на 2-3 порядка выше, чем обусловленного градиентом влажности.

4. Эффективные режимы ВЧ сушки, обеспечивающие высокое качество материала и наименьшие удельные затраты электроэнергии, могут быть получены только с применением конвективного подогрева воздуха в сушилке. Использование комбинированных режимов является не только экономически целесообразным, но и технологически необходимым.

5. Оптимальные значения температуры воздуха в сушилке составляет  $70 \pm 10^{\circ}\text{C}$ .

При более низких значениях увеличивается перепад влажности по сечению материала сверх нормативного, при более высоких - в первом периоде сушки происходит пересушка поверхностных слоёв, что приводит к их растрескиванию. С учётом этого для установок периодического действия режим должен быть 2-х ступенчатым: в первом периоде - до влажности  $25-30\%$ , температура воздуха -  $70 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , во втором -  $90-100^{\circ}\text{C}$ . Это позволит сохранить качество материала и снизить расход электроэнергии за счёт увеличения доли участия конвективного тепла.

6. Относительная влажность воздуха оказывает существенное влияние на эффективность режима только в области низких температур (температура в центре материала ниже  $95^{\circ}\text{C}$ ) и малых температурных градиентов (перепад температур в центре материала и воздуха в камере -  $10-15^{\circ}\text{C}$ ).

При высокотемпературных скоростных режимах (температура в центре материала выше  $100^{\circ}\text{C}$ ) её влияние становится очень незначительным и в боль-



шинстве случаев она может не регулироваться.

7. Для обеспечения высокой эффективности режима ВЧ сушки скорость воздуха в камере должна быть не ниже 2 м/сек.

8. Оптимальный режим высокочастотно-конвективной конвейерной сушки древесины бука, граба, берёзы, ольхи и резонансовой ели может быть обеспечен при следующих значениях режимных параметров:

Температура в центре материала	$105 \pm 5^{\circ}\text{C}$
Температура воздуха в сушилке	$70 \pm 10^{\circ}\text{C}$
Влажность воздуха	не регулируется
Скорость воздуха	1-2 м/сек.

9. Для обеспечения необходимого качества материала при сушке по этому режиму, продолжительность начального прогрева до температуры в центре материала  $90-95^{\circ}\text{C}$  не должна превышать 1 час. Необходимая удельная мощность по ВЧ при этом должна составлять в первом периоде -  $0,5-1 \text{ Вт/см}^3$ , но не выше  $5-6 \text{ Вт/см}^3$ , во 2-м периоде -  $0,3-0,5 \text{ Вт/см}^3$ .

10. Приведенный режим обеспечивает возможность одновременной качественной сушки древесины всех указанных пород и различной влажности и может использоваться как для установок непрерывного, так и периодического действия.

11. Для обеспечения I-й категории качества сушки материала с высокой равномерностью начальной влажности, среднее значение конечной влажности не должно превышать 6%.

12. Средняя продолжительность сушки заготовок всех пород при толщине 60-70 мм и длине до 1 метра от 60-70% до 6-8% влажности составила около 3-х часов при среднем расходе электроэнергии - 3,5 квтч на кг испаряемой влаги, по лабораторным данным, и 2,5 квтч/кг, по производственным данным.

13. Разработаны рабочие чертежи высокочастотно-конвективной конвейерной сушилки СЖ-4 и приведен способ расчёта её производительности и основных конструктивных параметров, применительно к оптимальному режиму сушки.

14. Проведенные поисковые исследования по отработке технологических приёмов и способов конвейерной сушки коротких заготовок показали, что наибольшая эффективность установки может быть обеспечена при сушке заготовок крупного сечения (не ниже 60 x 60 мм). Тонкие заготовки желательно высушивать кратными по толщине или в стопе по несколько штук.

Более благоприятные условия сушки могут быть обеспечены при поперечной укладке материала, что позволяет принять ряд мер по устранению пересушки торцов и создаёт лучшие условия для работы ВЧ оборудования.

15. Произведен подробный расчёт экономической эффективности использования такой установки применительно к различным условиям.

Внедрение такой установки на Молодечненской фабрике музыкальных инструментов позволит получить годовую экономию средств в сумме 36259 рублей, а коэффициент сравнительной экономической эффективности  $K = 0,91$ , что



20  
значительно выше отраслевого нормативного.  
С учётом изложенного выше, высокочастотно-конвективная сушка может быть рекомендована:

1. Для предприятий, где по условиям производства к качеству древесины предъявляются повышенные требования и в особенности при сушке таких пород, как бук, граб, клён, берёза и резонансовая ель.

2. Для предприятий с малым объёмом производства и обширной спецификацией высушиваемого материала трудносохнущих пород и в особенности там, где отсутствует технологический пар.

3. Для всех предприятий, где себестоимость сушки в существующих установках выше 24 руб./м<sup>3</sup>.

4. В районах с дешёвой электроэнергией во всех случаях сушки трудносохнущих пород и ответственного материала особо крупных сечений любых пород.

Содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. О высокотемпературной сушке древесины некоторых лиственных пород с применением диэлектрического нагрева - "Деревообрабатывающая промышленность", № 10, 1968 (в соавторстве с Биряковым В.А.).

2. Сушка древесины с применением диэлектрического нагрева - "Механическая обработка древесины", № 15, 1967 (в соавторстве с Биряковым В.А.).

3. Сушильные камеры с комбинированным нагревом ТВЧ и паром - "Деревообрабатывающая промышленность", № 7, 1966 (в соавторстве с Биряковым В.А.).

4. Быстрее в 100 раз - "Промышленность Белоруссии". № 2, 1970

5. Теоретическое обоснование комбинированной сушки древесины с применением нагрева в электрическом поле высокой частоты. "Совершенствование техники и технологии производств" (тезисы докладов научно-технической конференции, посвящённой 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции), Минск, БТИ им. С.М.Кирова, 1967 (в соавторстве с Биряковым В.А.).

Основные результаты работы доложены на следующих научно-технических конференциях:

1. Научно-техническая конференция, посвящённая 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции, БТИ им. С.М.Кирова, Минск, 1967 г.

2. Научно-техническая конференция Белорусского технологического института им. С.М.Кирова по итогам научных работ за 1968 год, Минск, 1969 г.