

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**В. Б. Снопков, И. Г. Федосенко**

# **ГИДРОТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ЗАЩИТА ДРЕВЕСИНЫ**

---

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано  
учебно-методическим объединением в области  
природопользования и лесного хозяйства  
в качестве учебно-методического пособия для студентов  
учреждений высшего образования по специальностям  
1-46 01 02 «Технология деревообрабатывающих производств»,  
1-08 01 01-04 «Профессиональное обучение (деревообработка)»,  
1-36 05 01 «Машины и оборудование лесного комплекса»,  
1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии  
и энергетический менеджмент»*

Минск 2015

УДК [674.047+674.048](075.8)  
ББК 37.130.3я75  
С53

Рецензенты:

кафедра «Металлические и деревянные конструкции» БНТУ  
(кандидат технических наук, доцент кафедры *А. В. Оковитый*);  
главный конструктор проекта «Научно-исследовательского  
института тепло- и массообмена имени академика  
*А. В. Лыкова*» НАН Беларуси *Н. М. Горбачев*

*Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».*

**Снопков, В. Б.**

**С53** Гидротермическая обработка и защита древесины. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие для студентов специальностей 1-46 01 02 «Технология деревообрабатывающих производств», 1-08 01 01-04 «Профессиональное обучение (деревообработка)», 1-36 05 01 «Машины и оборудование лесного комплекса», 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / В. Б. Снопков, И. Г. Федосенко. – Минск : БГТУ, 2015. – 140 с.  
ISBN 978-985-530-375-7.

Приведены методики выполнения 13 лабораторных работ. Описан порядок обработки и анализа полученных результатов. Каждой лабораторной работе предшествует теоретический материал, на котором основано выполнение экспериментальной части. В приложениях размещен справочно-информационный материал, необходимый для выполнения расчетов.

УДК [674.047+674.048](075.8)  
ББК 37.130.3я75

**ISBN 978-985-530-375-7** © УО «Белорусский государственный технологический университет», 2015  
© Снопков В. Б., Федосенко И. Г., 2015

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Древесина – ценный природный материал, широко используемый человеком для самых различных нужд. Характерной особенностью этого материала является зависимость физических и механических свойств от состояния, в котором он находится. С изменением температуры и влажности изменяются в широких пределах плотность, прочность, электропроводность, диэлектрическая проницаемость, биостойкость и другие свойства древесины. Отмеченная особенность широко используется в деревообрабатывающих производствах путем включения в технологический процесс гидротермической обработки древесины.

Гидротермическая обработка – это процессы воздействия на древесину тепла, газообразных агентов или жидкостей с целью изменения ее технологических и эксплуатационных характеристик. По особенностям практической реализации и назначению процессы гидротермической обработки разделяют на три группы: 1) процессы тепловой обработки, связанные с нагреванием древесины; 2) процессы сушки, связанные со снижением влажности древесины; 3) процессы пропитки, предусматривающие введение в древесину веществ, изменяющих ее свойства. Отсюда вытекает структура дисциплины «Гидротермическая обработка и защита древесины» для студентов специальностей «Технология деревообрабатывающих производств», «Профессиональное обучение (деревообработка)», «Машины и оборудование лесного комплекса», «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» и ее составной части – лабораторного практикума.

Целями лабораторного практикума являются овладение навыками проведения технологических процессов тепловой обработки, сушки и пропитки древесины, изучение приборов и методов измерения параметров обрабатывающих сред и свойств обрабатываемого материала, приобретение опыта решения творческих задач в области гидротермической обработки древесины.

Поставленные цели достигаются выполнением 13 лабораторных работ, охватывающих все разделы дисциплины. Каждая лабораторная работа состоит из нескольких экспериментальных задач

и рассчитана на выполнение небольшими бригадами студентов (2–3 человека) в течение 4 академических часов. Методической части работ предшествует теоретический материал, помещенный в раздел «Общие сведения». В них описаны закономерности изучаемых технологических процессов, свойства исследуемых систем и объектов. Предварительное ознакомление с теоретической частью обязательно для успешного выполнения работ. Авторы рекомендуют студентам при подготовке к занятиям не ограничиваться прочтением раздела «Общие сведения», а пользоваться специальной литературой, список которой приведен в настоящем пособии. Степень готовности к решению экспериментальных задач может быть проверена с помощью контрольных вопросов, сформулированных в конце каждой лабораторной работы.

В разделе «Порядок выполнения работы» содержатся перечень материалов, приборов и инструментов, необходимых для проведения исследований, описание экспериментальных установок, а также последовательность выполнения работ. Этот материал студенты обязаны изучить до начала занятий, чтобы не быть «привязанными» к книге во время выполнения задания.

Результаты экспериментальных исследований должны быть оформлены в виде отчета. Отчет включает номер лабораторной работы и ее название, перечень использованных материалов, приборов и инструментов, схему экспериментальной установки, описание методик проведенных измерений и исследований, таблицы экспериментальных данных. Большинство лабораторных работ предусматривает выполнение технологических расчетов. Необходимый для этого справочный материал содержится в приложениях. Последовательность выполнения и результаты расчетов также должны быть включены в отчет. Обязательным является анализ полученных результатов и формулирование выводов по итогам каждой лабораторной работы.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ**

*Цель работы:* овладение навыками определения влажности древесины прямыми и косвенными способами.

### **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Древесина состоит из разнообразных растительных клеток, имеющих преимущественно удлиненную форму, полых внутри. Полости внутри клеток имеют сравнительно большие размеры от 10 до 100 мкм. Их называют *макрокапиллярами*. Внутриклеточные полости соединены между собой порами, поперечный размер которых не превышает 0,1 мкм. Это так называемые *микрокапилляры*. Внутриклеточные полости и поры образуют в совокупности капиллярную систему, обладающую хорошей проницаемостью для газов и жидкостей, в том числе и для воды в обоих ее состояниях.

Вода, удерживаемая древесиной, может быть условно разделена на свободную и связанную. *Связанная вода* (ее еще называют гигроскопической) находится преимущественно на поверхности и в порах клеточных стенок. Она прочно удерживается древесинным веществом за счет адсорбционных сил и сил капиллярного взаимодействия. Соответственно связанная вода может быть *адсорбционной* и *микрокапиллярной*. *Свободная* (или *макрокапиллярная*) вода находится в полостях клеток. Силы капиллярного взаимодействия между этой водой и древесинным веществом очень малы, и потому она удерживается в древесине только механически. Древесина, в состав которой входит только связанная вода, называется *влажной*, а которая кроме связанной содержит еще и свободную воду – *сырой*.

Древесина является капиллярно-пористым коллоидным материалом. Стенки капилляров обладают свойствами ограниченно набухающих гелей. Это означает, что содержание в древесине связанной воды не может превышать некоторого максимума. Этот

максимум достигается при длительном контакте древесины с жидкой водой и называется *пределом насыщения клеточных стенок*. У большинства древесных пород, произрастающих на территории Беларуси, этот параметр приблизительно равен  $W_{\text{пн}} = 30\%$ . Если общая влажность древесины выше предела насыщения клеточных стенок ( $W > W_{\text{пн}}$ ), то это означает, что в ней кроме связанной воды содержится какое-то количество свободной.

Для того чтобы количественно оценить содержание воды в древесине, используют параметр, называемый влажностью. *Влажность* – это отношение массы воды, содержащейся в древесине, к массе абсолютно сухой или сырой (влажной) древесины, выраженное в процентах. В первом случае влажность называется *абсолютной*, во втором – *относительной*:

$$W_{\text{абс}} = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100\%; \quad (1)$$

$$W_{\text{отн}} = \frac{m - m_0}{m} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $W_{\text{абс}}$  и  $W_{\text{отн}}$  – абсолютная и относительная влажность соответственно, %;  $m$  – масса сырой (влажной) древесины, г;  $m_0$  – масса абсолютно сухой древесины, г.

В практике сушки древесины чаще используется значение абсолютной влажности.

Определение влажности древесины может быть проведено прямыми и косвенными способами. *Прямые* способы основаны на непосредственном измерении массы воды, присутствующей в древесине или удаленной из нее. Наиболее применимым из них является весовой способ (ГОСТ 16588–91), который в сушильном деле осуществляется следующим образом. От доски или заготовки на расстоянии не менее 300 мм от торца отпиливается образец, называемый *секцией влажности*. Размер образца вдоль волокон – около 10 мм. Предварительно взвешенная секция влажности высушивается в сушильном шкафу при температуре 100–105°C до постоянной массы. Значение влажности рассчитывают по формуле (1) или (2).

*Косвенные* способы основаны на измерении каких-либо характеристик древесины, зависящих от влажности. Одним из косвенных способов является электрический способ, реализуемый с помощью электровлагомеров. При этом могут контролироваться

электропроводность и диэлектрическая проницаемость древесины. В соответствии с этим различают кондуктометрические влагомеры и влагомеры переменного поля.

При сушке древесины большое значение имеет контроль текущей влажности. В зависимости от ее величины устанавливаются значения параметров сушильного агента и определяется время окончания сушки. Контроль текущей влажности древесины может быть осуществлен видоизмененным весовым способом, называемым *способом контрольных образцов*. Суть его состоит в следующем. Из партии древесины, загружаемой в сушильную камеру, выбирают доску, из которой выпиливают две секции влажности и контрольный образец длиной примерно 1000 мм. Контрольный образец и секции влажности взвешивают. Образец укладывают обратно в штабель, а по секциям определяют начальную влажность древесины, за которую принимают среднее арифметическое значение двух определений. Зная начальную влажность контрольного образца и его массу до начала сушки, можно рассчитать массу абсолютно сухого образца:

$$M_0 = \frac{100 \cdot M_n}{100 + W}, \quad (3)$$

где  $M_n$  – масса контрольного образца до начала сушки, г;  $W$  – начальная влажность древесины, определенная по секциям влажности, %.

В процессе сушки контрольный образец периодически извлекают из штабеля, взвешивают и вновь помещают в штабель. Текущую влажность рассчитывают по формуле

$$W_t = \frac{M_t - M_0}{M_0} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $M_t$  – текущая масса контрольного образца, г.

Чтобы повысить точность определения, в разные места штабеля можно закладывать несколько контрольных образцов.

Существенным недостатком способа контрольных образцов является необходимость периодического захода обслуживающего персонала в камеру. Поэтому в современных лесосушильных камерах используют дистанционный контроль влажности древесины, который может осуществляться следующими способами:

1) путем измерения в процессе сушки массы штабеля. Для этого внутри камеры монтируется весоизмерительное устройство, которое непрерывно или периодически взвешивает штабель в целом. Зная массу штабеля и начальную влажность древесины, рассчитывают текущую влажность пиломатериалов;

2) путем измерения усадки (изменения высоты) штабеля. Известно, что толщина пиломатериалов тесно связана с их влажностью в диапазоне от 30 до 0%. Таким образом, отслеживая высоту штабеля, всегда с достаточной точностью можно рассчитать среднюю влажность пиломатериалов;

3) электрическим способом. Для этого в разных местах штабеля устанавливают не менее 6 датчиков, каждый из которых представляет собой пару игольчатых электродов. Расстояние между электродами и глубина их внедрения в древесину зависят от конструктивных особенностей электровлагомера и толщины высушиваемых пиломатериалов. Датчики посредством проводов подключаются к показывающему и регистрирующему прибору, установленному на пульте управления камерой.

Электрический способ дистанционного контроля текущей влажности высушиваемых пиломатериалов получил в настоящее время наибольшее распространение. Он сравнительно дешев, не требует длительной подготовки к проведению измерений. Кроме того, электрический способ контроля влажности древесины легко совмещается с системой автоматического управления лесосушильными камерами.

## **2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

---

### **2.1. Материалы, приборы, инструменты:**

- контрольная доска длиной 2–3 м, начальной влажностью более 30% с покрытыми масляной краской торцами;
- масляная краска и кисть;
- полиэтиленовый пакет;
- весы аналитические (точность определения массы – 0,01 г);
- весы технические (точность определения массы – 1 г);
- сушильный шкаф, настроенный на температуру  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ ;
- электровлагомер;

- эксикатор;
- толщиномер (штангенциркуль);
- линейка (рулетка);
- ножовка;
- шило;
- шлифовальная шкурка.

## 2.2. Подготовка образцов.

2.2.1. Из контрольной доски в соответствии с рис. 1 ножовкой выпиливают две секции влажности и контрольный образец.

2.2.2. Отрезок 3 длиной в четыре толщины доски ( $4 \cdot S$  мм), отпиленный от края доски 4, отбрасывают.

2.2.3. Торцы выпиленных секций влажности 1 и контрольного образца 2 с помощью шлифовальной шкурки очищают от заусениц и маркируют.

2.2.4. Образовавшийся свежий торец контрольной доски покрывают масляной краской.

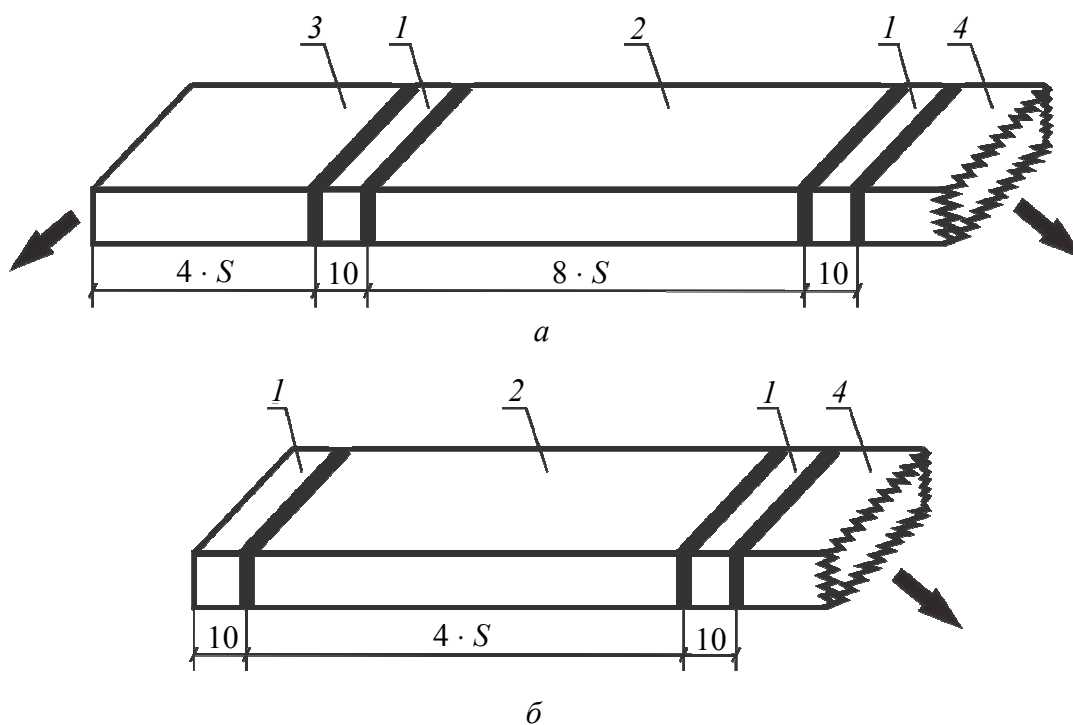


Рис. 1. Схема раскроя контрольной доски:

$a$  – при неопределенном характере распределения влажности по доске;

$б$  – при равномерном распределении влажности по доске;

1 – секция влажности; 2 – контрольный образец;

3 – отбрасываемый отрезок; 4 – контрольная доска

### 2.3. Определение начальной влажности древесины весовым способом.

2.3.1. Каждую секцию влажности взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,01 г. Полученные значения массы  $m$  заносят в табл. 1.

2.3.2. Взвешенные секции влажности помещают в сушильный шкаф с температурой  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

2.3.3. Секции влажности высушивают до постоянной массы. Для этого через каждые 10 мин сушки их извлекают из шкафа, взвешивают на аналитических весах и вновь помещают в шкаф. Эту процедуру проделывают до тех пор, пока два последних взвешивания секций не дадут одинаковый результат. Текущие значения массы  $m_T$  заносят в табл. 1, а конечные значения массы  $m_0$  – в табл. 2.

Таблица 1

Определение влажности секций

| Текущее время<br>от начала сушки, мин | Масса $m_T$ , г |            |
|---------------------------------------|-----------------|------------|
|                                       | 1-й секции      | 2-й секции |
| 0                                     |                 |            |
| 10                                    |                 |            |
| 20                                    |                 |            |
| 30                                    |                 |            |
| ...                                   |                 |            |

2.3.4. Вычисляют влажность каждой секции по формуле (1). Определяют начальную влажность древесины как среднее арифметическое значений влажности отдельных секций. Результаты вычислений заносят в табл. 2.

Таблица 2

Начальная влажность древесины \_\_\_\_\_

| Номер образца<br>(измерения) | Масса, г |       | Влажность, % |         |
|------------------------------|----------|-------|--------------|---------|
|                              | $m$      | $m_0$ | в опыте      | средняя |
| Секция № 1                   |          |       |              |         |
| Секция № 2                   |          |       |              |         |

## **2.4. Определение начальной влажности древесины кондуктометрическим способом с помощью электровлагомера Gann Hydromette HT.**

2.4.1. Открывают кейс и вынимают из него влагомер, измерительный кабель МК-8 и соответствующий электрод (М-18 или М-20). При этом необходимо учесть, что электрод М-20 применяют для пиломатериалов толщиной до 50 мм, а копер-электрод М-18 – до 180 мм.

2.4.2. На панели интерфейса устанавливают переключатель выбора породы древесины 4 (рис. 2) на требуемое значение. Следует учитывать, что для древесины, произрастающей и широко используемой в Республике Беларусь, основная доля пород соответствует группе № 3 (сосна, ель, кедр, пихта, лиственница, береза, ольха, тополь, вяз, ясень, клен) и лишь некоторые – группе № 2 (липа, ива, бук, дуб).

2.4.3. Устанавливают переключатель выбора температуры древесины 5 (рис. 2) на требуемое значение. Необходимо учитывать, что шаг изменяемой температуры – 5°C, он дает возможность точного контроля влажности при различных температурах.

2.4.4. Подключают измерительный кабель МК-8 к гнезду BNC 1 (рис. 2), наворачивая присоединительное кольцо кабеля на гнездо по часовой стрелке до упора.

2.4.5. Измерительный электрод вбивают (копер-электрод М-18) или вдавливают (электрод М-20) в образец древесины иглами на глубину от 1/4 до 1/3 его толщины. Направление проникновения игл и взаимное их расположение должно быть перпендикулярно направлению волокон древесины. Соседние замеры не должны располагаться ближе 10 см друг от друга. Между иглами должен располагаться сплошной материал (без трещин).

2.4.6. Разветвленные контакты измерительного кабеля вставляют в ответные отверстия электрода.

2.4.7. Нажимают кнопку 6 и в течение не более 3 с ожидают стабилизации показаний (не изменяющееся во времени число). Измеренное значение отображается на экране 3. После считывания информации с экрана кнопку необходимо незамедлительно отпустить.

2.4.8. Опыт повторяют не менее 3 раз, меняя расположение датчика по ширине контрольного образца. Результаты измерений, а также среднее арифметическое значение влажности записывают в табл. 3.

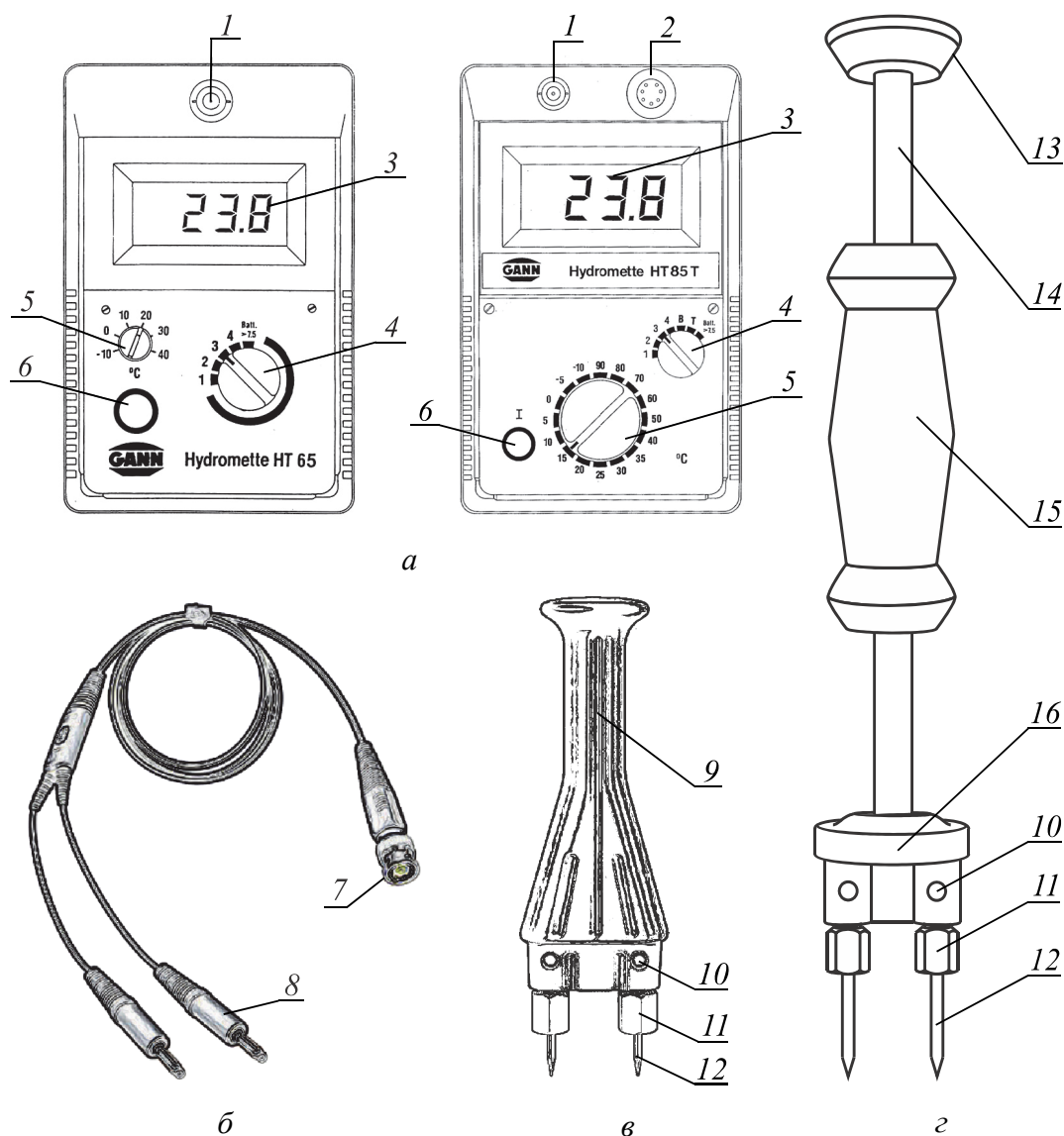


Рис. 2. Электровлагомеры серии Gann Hydromette HT:

*а* – общий вид контрольной панели влагомера;

*б* – измерительный кабель МК-8; *в* – электрод М-20;

*г* – копер-электрод М-18;

*1* – гнездо подключения измерительного кабеля типа BNC;

*2* – разъем подключения датчика температуры типа MS;

*3* – экран; *4* – переключатель выбора породы древесины;

*5* – переключатель выбора температуры древесины;

*6* – кнопка начала/окончания измерений;

*7* – присоединительное кольцо типа BNC; *8* – разветвленные контакты;

*9* – ударопрочная пластиковая рукоятка; *10* – отверстия

для разветвленных контактов; *11* – гайка крепления игл;

*12* – игла; *13* – металлический упор; *14* – штанга;

*15* – молот (копер); *16* – наковальня

Таблица 3

Текущая влажность древесины \_\_\_\_\_ через \_\_\_\_ ч  
после начала сушки

| Способ измерения влажности    | Экспериментальные параметры контрольного образца |                                        | Расчетные параметры контрольного образца | Текущая влажность, % |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|----------------------|
|                               | начальные                                        | текущие                                |                                          |                      |
| 1. Метод контрольных образцов | $M_n =$                                          | $M_t =$                                | $M_0 =$                                  | $W_t =$              |
| 2. По величине усушки         | $S_n =$                                          | $S_t =$                                | $Y_t =$<br>$Y_{\max} =$                  | $W_t =$              |
| 3. Кондуктометрический способ | $W_{1n} =$<br>$W_{2n} =$<br>$W_{3n} =$           | $W_{1t} =$<br>$W_{2t} =$<br>$W_{3t} =$ | $W_{\text{ср.н}} =$                      | $W_t =$              |

2.4.9. После измерений отсоединяют присоединительные контакты измерительного кабеля от интерфейса и электрода с особой осторожностью, без применения силы. Категорически запрещается тянуть за кабель. Далее, раскачивая электрод в плоскости игл, осторожно извлекают его из древесины, и весь комплект укладывают в кейс.

## 2.5. Определение текущей влажности древесины методом контрольных образцов и по величине усушки.

2.5.1. Контрольный образец взвешивают на технических весах с точностью до 1 г. Полученное значение массы  $M_n$  заносят в табл. 3.

2.5.2. Используя толщиномер (штангенциркуль), определяют толщину контрольного образца. Для этого проводят по 3 измерения с каждого торца. Рассчитывают среднее арифметическое 6 измерений  $S_n$ , которое записывают в табл. 3.

2.5.3. После того как влагомером определена влажность, произведено взвешивание и измерение, контрольный образец помещают в сушильный шкаф с температурой  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ , где его выдерживают в течение 1 ч или другого времени (по указанию преподавателя).

2.5.4. По истечении заданного времени контрольный образец помещают в полиэтиленовый пакет, запаивают его или плотно закрывают и в таком положении охлаждают до комнатной температуры.

2.5.5. Охлажденный контрольный образец извлекают из пакета, взвешивают и измеряют в соответствии с п. 2.5.1 и 2.5.2. Значения текущей массы  $M_t$  и текущей толщины  $S_t$  заносят в табл. 3.

2.5.6. По формуле (3) рассчитывают массу контрольного образца в абсолютно сухом состоянии, а по формуле (4) – текущую влажность древесины, полученную по методу контрольных образцов.

2.5.7. Рассчитывают текущую влажность древесины по величине усушки, используя следующие формулы:

$$W_T = 30 \cdot \left( 1 - \frac{Y_T}{Y_{\max}} \right); \quad (5)$$

$$Y_T = \frac{S_H - S_T}{S_H} \cdot 100\%; \quad (6)$$

$$Y_{\max}^{\text{танг}} = 0,018 \cdot \rho_b \quad \text{или} \quad Y_{\max}^{\text{рад}} = 0,01 \cdot \rho_b, \quad (7)$$

где  $Y_T$  – текущая усушка контрольного образца, %;  $Y_{\max}$  – максимальная усушка древесины данной породы в тангенциальном ( $Y_{\max}^{\text{танг}}$ ) или радиальном ( $Y_{\max}^{\text{рад}}$ ) направлении, %;  $\rho_b$  – базисная плотность древесины (приложение 1), кг/м<sup>3</sup>.

2.5.8. Значения текущей влажности древесины, определенные методом контрольных образцов и по величине усушки, записывают в табл. 3.

## **2.6. Определение текущей влажности кондуктометрическим способом.**

Определение проводят по методике, описанной в п. 2.4. При этом для внедрения игл датчика влагомера используют те же отверстия, что и при определении начальной влажности. Результаты измерений заносят в табл. 3.

## **2.7. Анализ полученных результатов.**

Сопоставляют результаты измерения текущей влажности древесины, полученные методом контрольных образцов, по величине усушки и кондуктометрическим способом (табл. 3). Дают сравнительную характеристику изученным способам.

# **3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что означает выражение «древесина – капиллярно-пористый коллоидный материал»?

2. Что такое макро- и микрокапилляры древесины?
3. Что такое связанная и свободная вода? За счет каких сил она удерживается в древесине?
4. Чем различаются понятия «сырая» и «влажная» древесина?
5. Что такое предел насыщения клеточных стенок? Чему он равен?
6. Как определить абсолютную и относительную влажность древесины?
7. Какие способы определения влажности древесины называются прямыми, а какие – косвенными?
8. В чем суть весового способа определения влажности древесины?
9. Какие бывают косвенные способы определения влажности древесины?
10. Для чего применяется способ контрольных образцов? В чем его суть?
11. Какие способы существуют для контроля текущей влажности древесины во время сушки?

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСИНЫ И ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

*Цель работы:* изучение явления гигроскопичности, определение устойчивой и равновесной влажности древесины.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Древесина является гигроскопичным материалом. Это означает, что она способна изменять свою влажность в зависимости от состояния окружающего воздуха. Влажность, к которой стремится древесина при выдержке ее в воздухе определенного состояния, называется *устойчивой влажностью*. Достигнуть устойчивого влажностного состояния древесина может двумя путями: а) поглощая водяной пар из воздуха (сорбция), если ее начальная влажность ниже устойчивой влажности; б) выделяя водяной пар в воздух (десорбция), если ее начальная влажность выше устойчивой влажности. Однако конечный результат в этих двух случаях будет неодинаковым (рис. 3). Для одного и того же состояния окружающего воздуха устойчивая влажность при сорбции ( $W_{yc}$ ) будет меньше, чем при десорбции ( $W_{уд}$ ). Разность между ними называют *показателем гистерезиса сорбции*:

$$\Delta W_{yc} = W_{уд} - W_{yc}. \quad (8)$$

Максимальная устойчивая влажность, приобретаемая сухой древесиной при ее длительной выдержке в насыщенном паром воздухе, называется *пределом гигроскопичности*. Водяной пар из воздуха поглощают только клеточные стенки. Конденсация пара в свободную воду в полостях клеток (в макрокапиллярах) практически не происходит. Таким образом, можно сказать, что предел гигроскопичности соответствует состоянию древесины, при котором

она поглотила путем сорбции максимально возможное количество связанной воды, но не содержит свободной. Предел гигроскопичности при температуре воздуха 18–20°C наступает при влажности древесины приблизительно 30%. С повышением температуры он снижается и при 100°C уже соответствует влажности 19–20%.

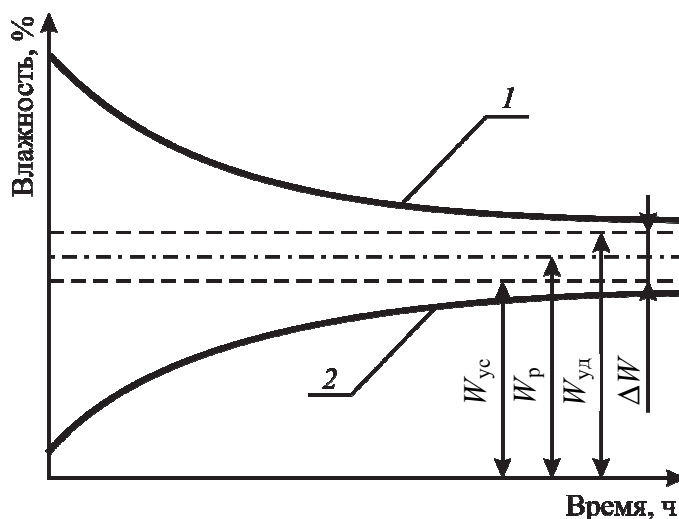


Рис. 3. Кривые изменения влажности древесины при выдержке ее во влажном воздухе:  
1 – при сорбции; 2 – при десорбции водяного пара

Величина гистерезиса сорбции зависит от состояния воздуха и, главным образом, от размеров образца древесины. Для мелких древесных частиц (опилок, стружки) гистерезис сорбции составляет 0,2–0,3%. Чем больше размеры образца, тем больше показатель гистерезиса. Для образцов, толщина которых превышает 15 мм, а длина – 100 мм, он достигает величины, равной 2,5%, и далее остается неизменным.

Среднее арифметическое устойчивой влажности при сорбции и десорбции называется *равновесной влажностью*:

$$W_p = \frac{W_{yc} + W_{уд}}{2}, \% \quad (9)$$

Для определения равновесной влажности удобно пользоваться диаграммой, построенной в координатах «относительная влажность воздуха – температура» (приложение 3).

Устойчивая влажность древесины при сорбции и десорбции также может быть найдена по диаграмме равновесной влажности с

учетом показателя гистерезиса. При этом в случае древесины, не подвергавшейся воздействию высоких температур (атмосферная сушка), пользуются уравнениями

$$W_{\text{уд}} = W_{\text{р}} + \frac{1}{2} \cdot \Delta W; \quad W_{\text{ус}} = W_{\text{р}} - \frac{1}{2} \cdot \Delta W. \quad (10)$$

Для древесины, высушенной в камерах, применяют другие выражения:

$$W_{\text{уд}} = W_{\text{р}}; \quad W_{\text{ус}} = W_{\text{р}} - \Delta W. \quad (11)$$

## 2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 2.1. Материалы, приборы, инструменты:

- лущеный шпон начальной влажностью более 30%;
- весы аналитические (точность определения массы – 0,01 или 0,001 г);
- сушильный шкаф, настроенный на температуру  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ ;
- подставка для образцов шпона;
- психрометр;
- эксикатор;
- ножницы;
- линейка;
- карандаш.

### 2.2. Подготовка образцов шпона.

2.2.1. Из листа сырого лущеного шпона вырезают ножницами 6 образцов размерами  $30 \times 30$  мм. Карандашом маркируют образцы номерами от 1 до 6.

2.2.2. Образцы взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,01 г. Полученные значения массы  $m_1 - m_3$  заносят в табл. 4,  $m_4 - m_6$  – в табл. 5 (строка  $\tau = 0$  мин).

Таблица 4

**Начальная влажность шпона**

| Номер образца | Масса, г  |          | Влажность, % |         |
|---------------|-----------|----------|--------------|---------|
|               | начальная | конечная | опытная      | средняя |
|               |           |          |              |         |

Таблица 5

**Определение устойчивой влажности древесины**

| Время от начала опыта, мин | Масса образца, г |     |     |     | Текущая влажность образца, % |     |     |     | Средняя влажность древесины, % |               |
|----------------------------|------------------|-----|-----|-----|------------------------------|-----|-----|-----|--------------------------------|---------------|
|                            | № 1              | № 2 | ... | № 6 | № 1                          | № 2 | ... | № 6 | при сорбции                    | при десорбции |
| 0                          |                  |     |     |     |                              |     |     |     |                                |               |
| 15                         |                  |     |     |     |                              |     |     |     |                                |               |
| 30                         |                  |     |     |     |                              |     |     |     |                                |               |
| ...                        |                  |     |     |     |                              |     |     |     |                                |               |

**2.3. Определение начальной влажности шпона.**

2.3.1. Взвешенные образцы № 1–3 помещают в сушильный шкаф с температурой  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

2.3.2. Образцы высушивают до постоянной массы. Для этого через 30 мин сушки их извлекают из шкафа, охлаждают в эксикаторе, взвешивают на аналитических весах и вновь помещают в шкаф. Далее эту процедуру проделывают каждые 5 мин до тех пор, пока два последних взвешивания образцов не дадут одинаковый результат. Полученные значения массы абсолютно сухих образцов записывают в табл. 4.

2.3.3. Рассчитывают влажность каждого образца по формуле (1). Определяют начальную влажность шпона как среднее арифметическое значений влажности отдельных образцов. Полученный результат заносят в табл. 4.

2.3.4. Для снижения продолжительности подготовки шпона к эксперименту студент может получить 4 сырых и 3 высушенных до абсолютно-сухого состояния образца шпона. При этом начальная влажность сухих образцов должна составлять 0%, а сырых –  $x\%$ . Чтобы отыскать величину  $x$ , студент выбирает из четырех сырых образцов один и помещает в сушильный шкаф, где высушивает его по п. 2.3.1–2.3.2. Три сырых и три сухих образца в то же время нужно расположить перед вентилятором согласно п. 2.4.2–2.4.3.

**2.4. Определение устойчивой и равновесной влажности древесины, гистерезиса сорбции.**

2.4.1. Включают вентилятор. Перед вентилятором располагают подставку для образцов шпона.

2.4.2. На подставку укладывают предварительно взвешенные образцы шпона № 4–6 таким образом, чтобы они находились в потоке воздуха.

2.4.3. Через каждые 5 мин образцы взвешивают на аналитических весах и вновь укладывают на подставку.

2.4.4. По формуле (3) рассчитывают массу абсолютно сухих образцов № 4–6, а по формуле (4) определяют их текущую влажность и среднее значение влажности древесины для каждого момента времени. Результаты взвешиваний и расчетов записывают в табл. 5.

2.4.5. После определения начальной влажности шпона высохшие образцы № 1–3 также помещают на подставку перед вентилятором.

2.4.6. В отношении этих образцов выполняют действия, описанные в п. 2.4.3 и 2.4.4.

2.4.7. Выдержку образцов перед вентилятором и периодическое взвешивание производят до тех пор, пока масса образцов не перестанет изменяться.

2.4.8. По полученным результатам строят графические зависимости изменения влажности древесины во времени аналогично рис. 3.

2.4.9. По графикам определяют значения устойчивой влажности при сорбции и десорбции.

2.4.10. Используя формулы (9) и (8), рассчитывают значения равновесной влажности и гистерезиса сорбции. Равновесную влажность определяют также по диаграмме равновесной влажности. Результаты выполненных действий заносят в табл. 6.

## **2.5. Определение параметров воздуха.**

2.5.1. Используя психрометр, установленный в лаборатории, фиксируют показания сухого и смоченного (увлажненного) термометров. Рассчитывают психрометрическую разность. Результаты определений заносят в табл. 6.

2.5.2. Относительную влажность воздуха в лаборатории определяют двумя способами: с помощью психрометрической таблицы, размещенной на лицевой панели психрометра, а также используя *Id*-диаграмму влажного воздуха. Результаты определений заносят в табл. 6.

## **2.6. Анализ полученных результатов.**

2.6.1. Сравнивают экспериментально полученные графические зависимости изменения влажности древесины во времени с кривыми, приведенными на рис. 3. Делают вывод о степени завершенности эксперимента. Отмечают время, необходимое для достижения устойчивой влажности древесины.

2.6.2. Анализируют данные табл. 6. Сопоставляют значения равновесной влажности древесины, полученные экспериментально и с использованием диаграммы равновесной влажности. Оценивают величину гистерезиса сорбции, сравнивая ее с литературными данными.

Таблица 6

**Параметры древесины и воздуха**

| Параметры                                    | Значения параметров |
|----------------------------------------------|---------------------|
| <b>Древесина</b>                             |                     |
| 1. Устойчивая влажность при десорбции, %     |                     |
| 2. Устойчивая влажность при сорбции, %       |                     |
| 3. Гистерезис сорбции, %                     |                     |
| 4. Равновесная влажность, %, определенная:   |                     |
| – экспериментально                           |                     |
| – по диаграмме равновесной влажности         |                     |
| <b>Воздух</b>                                |                     |
| 5. Температура сухого термометра, °С         |                     |
| 6. Температура смоченного термометра, °С     |                     |
| 7. Психрометрическая разность, °С            |                     |
| 8. Относительная влажность, %, определенная: |                     |
| – по психрометрической таблице               |                     |
| – по <i>Id</i> -диаграмме                    |                     |

**3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое гигроскопичность древесины?
2. Что называется устойчивой влажностью древесины?
3. Как можно экспериментально определить значения устойчивой влажности при сорбции и десорбции?
4. Что такое предел гигроскопичности? Как он зависит от температуры воздуха?
5. Как определить показатель гистерезиса сорбции?
6. От чего зависит и чему равен гистерезис сорбции?
7. Что такое равновесная влажность древесины?
8. В системе каких координат построена диаграмма равновесной влажности древесины?
9. Каким образом, зная равновесную влажность, можно рассчитать устойчивую влажность древесины при сорбции и десорбции?
10. Как можно определить параметры воздуха в помещении?

## **ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ**

*Цель работы:* изучение тепловых свойств древесины, определение удельной теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности.

### **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

#### **1.1. Тепловые свойства древесины.**

При выполнении расчетов процессов гидротермической обработки древесины необходимо знать ее тепловые свойства – теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность.

Теплоемкость материала характеризует его способность аккумулировать тепло. Показателем этого свойства является удельная теплоемкость, представляющая собой количество теплоты, необходимой для нагревания единицы массы древесины на  $1^{\circ}\text{C}$ . Размерность этого параметра в системе СИ –  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ . Удельная теплоемкость древесины не зависит от породы и при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  для абсолютно сухого состояния равна  $1,55 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ . С повышением температуры удельная теплоемкость древесины возрастает по линейному закону и при  $100^{\circ}\text{C}$  увеличивается примерно на 25%. Сильнее на теплоемкость древесины влияет ее влажность. Вода имеет примерно в 2,5 раза большую теплоемкость, чем древесинное вещество. Поэтому увеличение влажности вызывает повышение теплоемкости древесины. Увлажнение ее от 0 до 130% приводит к повышению теплоемкости примерно в 2 раза. Замораживание древесины приводит к уменьшению теплоемкости, так как лед имеет вдвое меньшую теплоемкость, чем вода. Для определения удельной теплоемкости древесины в зависимости от температуры и влажности удобно пользоваться диаграммой, приведенной в приложении 4.

Теплопроводность характеризует интенсивность перемещения теплоты в материале. Количественной оценкой этого свойства древесины является коэффициент теплопроводности, который равен количеству теплоты, проходящей через плоскую стенку площадью  $1 \text{ м}^2$  и толщиной  $1 \text{ м}$  при разности температуры на противоположных сторонах стенки  $1^\circ\text{С}$ . Размерность этого параметра –  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ . На способность древесины проводить теплоту оказывают влияние многие факторы. Один из наиболее значимых – плотность древесины. Увеличение плотности, т. е. повышение доли древесинного вещества в объеме древесины, приводит к возрастанию теплопроводности. Это связано с тем, что древесинное вещество имеет примерно в 20 раз больший коэффициент теплопроводности, чем воздух. Древесина является анизотропным материалом, и поэтому ее теплопроводность в различных структурных направлениях неодинакова. В направлении вдоль волокон коэффициент теплопроводности в 1,6–2,2 раза больше, чем в поперечном направлении. У хвойных пород древесины и большинства лиственных значения коэффициентов теплопроводности в радиальном и тангенциальном направлениях очень близки и при выполнении технологических расчетов принимаются одинаковыми. Исключение составляют лиственные породы древесины с развитыми сердцевинными лучами (дуб, бук, клен и др.). В этом случае коэффициент теплопроводности в радиальном направлении больше, чем в тангенциальном примерно на 15%. Повышение влажности и температуры древесины приводит к увеличению ее теплопроводности. Замораживание древесины влажностью выше предела насыщения клеточных стенок ведет к скачкообразному увеличению ее теплопроводности, так как коэффициент теплопроводности льда в 4 раза больше, чем воды.

Коэффициент теплопроводности может быть определен с помощью диаграммы, размещенной в приложении 5. По ней находят значение коэффициента для древесины березы поперек волокон. Для других пород и структурных направлений древесины его величину уточняют с помощью формулы

$$\lambda = \lambda_n \cdot k_p \cdot k_x, \quad (12)$$

где  $\lambda_n$  – номинальное значение коэффициента теплопроводности, найденное по диаграмме,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ ;  $k_p$  и  $k_x$  – коэффициенты, учитывающие базисную плотность древесины и направление теплового потока, определяются по таблицам приложения 6.

Температуропроводность характеризует теплоинерционность (скорость изменения температуры) древесины. Коэффициент температуропроводности  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) рассчитывают по формуле

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \quad (13)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ ;  $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$ ;  $\rho$  – плотность древесины,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Наиболее значимым фактором, влияющим на коэффициент температуропроводности, является влажность древесины. Увеличение содержания свободной влаги ( $W > W_{\text{пн}}$ ) приводит к резкому падению температуропроводности.

### 1.2. Измерение тепловых свойств древесины.

Для определения удельной теплоемкости твердых тел, сыпучих материалов и жидкостей, а также для исследования зависимости этого параметра от температуры применяют измеритель теплоемкости ИТ-с-400. Тепловая схема прибора показана на рис. 4.

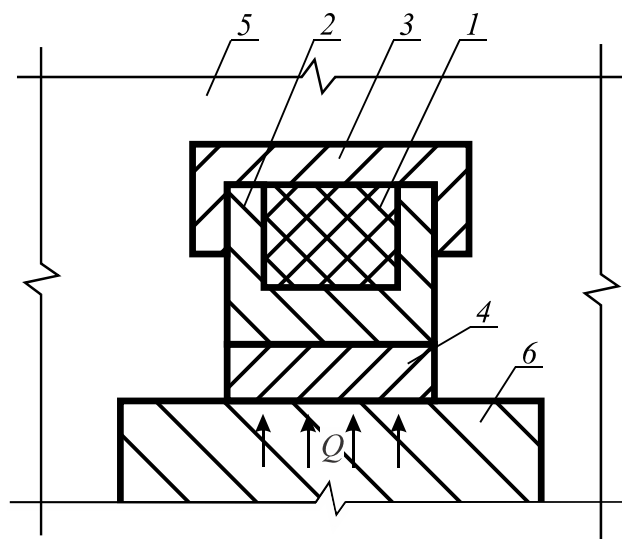


Рис. 4. Тепловая схема измерителя теплоемкости ИТ-с-400:

- 1 – испытуемый образец;
- 2 – металлическая ампула; 3 – колпачок;
- 4 – тепломер; 5 – адиабатическая оболочка;
- 6 – нагреватель

При проведении измерения испытуемый образец 1, помещенный внутрь металлической ампулы 2 и накрытый колпачком 3, на-

гревают с помощью нагревателя 6. Тепловой поток  $Q$  поступает к ампуле через тепломер 4. Для того чтобы тепловая связь ампулы и образца с внешней средой осуществлялась только через тепломер, открытые участки поверхности ампулы изолированы от среды адиабатической оболочкой 5.

Тепловой поток  $Q$ , проходящий через тепломер, расходуется на разогрев испытуемого образца и металлической ампулы с крышкой:

$$Q = Q_o + Q_a; \quad (14)$$

$$Q_o = c \cdot m_o \cdot b; \quad (15)$$

$$Q_a = c_a \cdot m_a \cdot b, \quad (16)$$

где  $Q_o$  – теплота, расходуемая на нагревание образца, Вт;  $Q_a$  – теплота, расходуемая на нагревание ампулы, Вт;  $c$  – удельная теплоемкость испытуемого образца, Дж/(кг·°C);  $m_o$  – масса образца, кг;  $b$  – скорость разогрева, °C/с;  $c_a$  – удельная теплоемкость материала ампулы, Дж/(кг·°C);  $m_a$  – масса ампулы с крышкой, кг.

Величину теплового потока, проходящего через тепломер, можно определить, используя выражение

$$Q = k_T \cdot \Delta T, \quad (17)$$

где  $k_T$  – тепловая проводимость тепломера, являющаяся постоянной прибора, Дж/(с·°C);  $\Delta T$  – перепад температуры на тепломере, °C.

Используя формулы (14)–(17), получаем уравнение для расчета удельной теплоемкости испытуемого образца:

$$c = \frac{1}{m_o} \cdot \left( \frac{k_T \cdot \Delta T}{b} - c_a \cdot m_a \right). \quad (18)$$

При малых перепадах температуры на тепломере уравнение (18) приобретает вид

$$c = \frac{k_T}{m_o} \cdot (\tau_T - \tau_T^0), \quad (19)$$

где  $\tau_T$  – время запаздывания температуры на тепломере, с;  $\tau_T^0$  – время запаздывания температуры на тепломере в экспериментах с пустой ампулой, с. Параметры  $\tau_T^0$  и  $k_T$  являются постоянными прибора.

Теплопроводность твердых тел определяют с помощью измерителя теплопроводности ИТ-л-400, тепловая схема которого приведена на рис. 5.

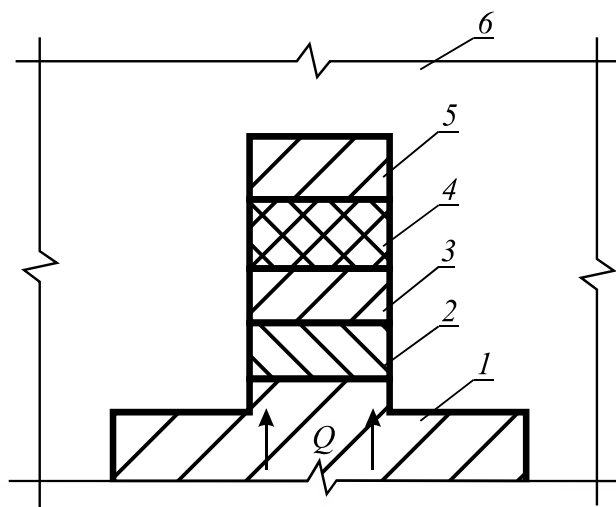


Рис. 5. Тепловая схема измерителя теплопроводности ИТ-л-400:

- 1 – основание; 2 – пластина;  
3 – контактная пластина;  
4 – испытуемый образец; 5 – стержень;  
6 – адиабатическая оболочка

При проведении измерения испытуемый образец 4, пластины 2, 3 и стержень 5 разогреваются тепловым потоком  $Q$ , поступающим от основания 1. Боковые поверхности всех перечисленных элементов адиабатически изолированы. Стержень 5 и контактная пластина 3 изготовлены из меди, обладающей высокой теплопроводностью, и поэтому перепады температуры на них незначительны. Тепловой поток  $Q$ , проходящий через пластину 2, частично поглощается ею и далее идет на разогрев контактной пластины 3, образца 4 и стержня 5. При этом тепловые потоки, проходящие через измерительную ячейку, могут быть описаны уравнениями

$$Q_o = \frac{\Delta T_o \cdot S}{P} = \left( \frac{1}{2} C_o + C_c \right) \cdot b; \quad (20)$$

$$Q_T = r_T \cdot \Delta T_T = \left( \frac{1}{2} C_T + C_{\Pi} + C_o + C_c \right) \cdot b, \quad (21)$$

где  $Q_o$  и  $Q_T$  – тепловые потоки, проходящие через образец и пластину 2, Вт;  $\Delta T_o$  и  $\Delta T_T$  – перепады температуры на образце и пластине 2, °С;  $S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;  $C_o$ ,  $C_c$ ,  $C_T$ ,  $C_{\Pi}$  – полные теплоемкости испытуемого образца, стержня, пластины 2 и контактной пластины 3, Дж/°С;  $b$  – скорость разогрева

измерительной ячейки,  $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ;  $r_{\text{т}}$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий эффективную тепловую проводимость пластины 2,  $\text{Вт}/^{\circ}\text{C}$ .

Регистрируя величину температурного перепада на образце, можно определить потери теплоты при прохождении через него теплового потока. По величине этих потерь можно оценить тепловое сопротивление материала образца, а значит, и его теплопроводность:

$$P_o = \frac{\Delta T_o \cdot S \cdot (1 + \sigma)}{\Delta T_{\text{т}} \cdot r_{\text{т}}} - P_{\text{к}}; \quad (22)$$

$$\lambda = \frac{h}{P_o}, \quad (23)$$

где  $P_o$  – тепловое сопротивление испытуемого образца,  $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ;  $\sigma$  – поправка, учитывающая теплоемкость испытуемого образца;  $P_{\text{к}}$  – поправка, учитывающая тепловое сопротивление контакта и измерительных термодатчиков,  $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $h$  – высота образца, м.

Поправка  $\sigma$  рассчитывается по формуле

$$\sigma = \frac{C_o}{2 \cdot (C_o + C_c)}. \quad (24)$$

В свою очередь, полная теплоемкость испытуемого образца  $C_o$  определяется из выражения

$$C_o = c_o(t) \cdot m_o, \quad (25)$$

где  $c_o(t)$  – удельная теплоемкость образца при данной температуре,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $m_o$  – масса образца, кг.

Величины  $r_{\text{т}}$ ,  $P_{\text{к}}$  и  $C_c$  являются постоянными для данного прибора, не зависят от свойств испытуемого образца и определяются предварительно в градуировочных экспериментах.

## **2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 3**

### **2.1. Материалы, приборы, инструменты:**

- образцы древесины цилиндрической формы диаметром  $(15 \pm 1)$  мм и высотой  $(10 \pm 0,5)$  мм;
- графитовый порошок или алюминиевая пудра;

- измеритель теплоемкости ИТ-с-400;
- весы аналитические (точность определения массы – 0,01 г);
- толщиномер (штангенциркуль).

## 2.2. Подготовка образца.

2.2.1. Получают у преподавателя испытуемый образец, выясняют породу древесины, из которой он изготовлен.

2.2.2. С помощью толщиномера (штангенциркуля) измеряют диаметр и высоту образца. Точность измерения – 0,1 мм.

2.2.3. Образец взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,01 г.

2.2.4. Вычисляют объем и плотность образца по формулам:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} h; \quad (26)$$

$$\rho = \frac{m_0}{V}, \quad (27)$$

где  $V$  – объем образца,  $\text{м}^3$ ;  $d$  и  $h$  – диаметр и высота образца, м;  $\rho$  – плотность образца,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $m_0$  – масса образца, кг.

2.2.5. Результаты измерений и расчетов заносят в табл. 7.

Таблица 7

Свойства испытуемого образца

| Параметр                             | Значение |
|--------------------------------------|----------|
| 1. Порода древесины                  |          |
| 2. Диаметр, м                        |          |
| 3. Высота, м                         |          |
| 4. Масса, кг                         |          |
| 5. Объем, $\text{м}^3$               |          |
| 6. Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ |          |

2.2.6. Торцы испытуемого образца натирают графитовым порошком (алюминиевой пудрой) для улучшения теплового контакта с металлической ампулой и крышкой (рис. 4).

## 2.3. Проведение испытания.

2.3.1. Определение удельной теплоемкости проводят на измерителе теплоемкости ИТ-с-400, который изображен на рис. 6.

2.3.2. Открывают измерительную ячейку 1, поднимая верхнюю половину ее корпуса. Испытуемый образец помещают внутрь

металлической ампулы и накрывают металлическим колпачком. Опуская верхнюю половину корпуса, закрывают ячейку.

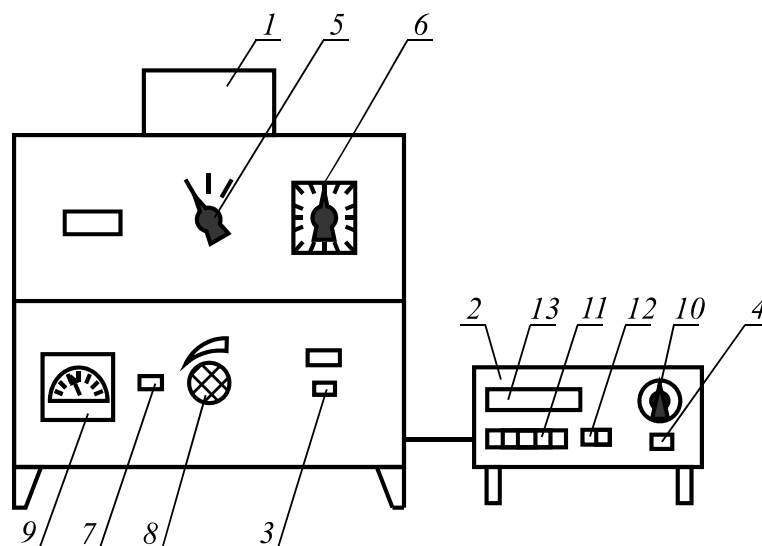


Рис. 6. Измеритель теплоемкости ИТ-с-400:

- 1 – измерительная ячейка; 2 – микровольтнаноамперметр;  
 3, 4 – кнопки «Сеть»; 5 – переключатель «Измерение»;  
 6 – переключатель «Температура»; 7 – кнопка «Нагрев»;  
 8 – рукоятка настройки вольтметра; 9 – вольтметр;  
 10 – переключатель диапазонов измерения;  
 11 – пульт установки прибора в нулевое положение;  
 12 – кнопка «АРР»; 13 – шкала

2.3.3. Нажатием кнопок «Сеть» 3 и 4 включают измеритель теплоемкости и микровольтнаноамперметр 2. Переключатель «Измерение» 5 устанавливают в положение « $t_1$ », а переключатель «Температура» 6 – в положение «0». Прибор прогревают в течение 20–30 мин.

2.3.4. Включают нагреватель кнопкой «Нагрев» 7, рукояткой 8 устанавливают на вольтметре 9 начальное напряжение 40 В. Переключатель 6 переводят в положение 25°C. С помощью переключателя 10 устанавливают диапазон измерений микровольтнаноамперметра 2. Нажимая кнопку « $\mu V$ » на пульте 11, устанавливают прибор в нулевое положение. Включают микровольтнаноамперметр на измерение отжатию кнопки «АРР» 12.

2.3.5. При достижении заданной температуры световой указатель микровольтнаноамперметра подходит к нулевой отметке шкалы 13. В этот момент переключатель 5 быстро переводят в положение « $t_2$ » и одновременно включают секундомер. Когда инди-

катор шкалы *13* вновь подойдет к нулевой отметке, выключают секундомер и записывают его показания в столбец « $\tau_t$ » табл. 8.

Таблица 8

### Определение удельной теплоемкости

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\tau_t, \text{с}$ | $\tau_t^0, \text{с}$ | $k_t, \text{Вт}/^\circ\text{C}$ | Теплоемкость, Дж/(кг·°C), определенная |               |
|---------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------|---------------|
|                     |                    |                      |                                 | экспериментально                       | по номограмме |
| 25                  | —                  | —                    | —                               | —                                      |               |
| 50                  |                    | 13,2                 | 0,372                           |                                        |               |
| 75                  |                    | 13,0                 | 0,377                           |                                        |               |
| 100                 |                    | 12,8                 | 0,382                           |                                        |               |
| 125                 |                    | 12,6                 | 0,387                           |                                        |               |

2.3.6. Переключатель *6* переводят в положение  $50^\circ\text{C}$  и вновь включают секундомер. Производят определение времени запаздывания  $\tau_t$  для следующего значения температуры. Описанную процедуру повторяют, последовательно переводя переключатель *6* в положения  $75$  и  $100^\circ\text{C}$ . Все результаты определения  $\tau_t$  фиксируют в табл. 8.

2.3.7. После проведения последнего измерения рукояткой *8* выводят вольтметр *9* в нулевое положение. Кнопкой *7* выключают нагреватель. Переключатели *5* и *6* устанавливают в исходное положение. Арретируют микровольтнаноамперметр нажатием кнопки «АРР» *12*. Отключают приборы от сети кнопками *3* и *4*.

2.3.8. Поднимают верхнюю часть корпуса измерительной ячейки *1*. Оставляют ее в таком положении для охлаждения до комнатной температуры. Из остывшей металлической ампулы извлекают испытуемый образец. Измерительную ячейку возвращают в исходное положение.

### 2.4. Определение удельной теплоемкости.

2.4.1. Расчет удельной теплоемкости по результатам проведенных измерений производят с использованием формулы (19). Параметры  $k_t$  и  $\tau_t^0$  являются постоянными прибора. Их значения в зависимости от температуры приведены в табл. 8.

2.4.2. Определяют удельную теплоемкость древесины для температуры  $25, 50, 75$  и  $100^\circ\text{C}$  по номограмме приложения 4.

2.4.3. Результаты расчетов по п. 2.4.1 и определения удельной теплоемкости по п. 2.4.2 заносят в табл. 8.

### 2.5. Анализ полученных результатов.

Сопоставляют значения удельной теплоемкости древесины, полученные экспериментально и определенные по номограмме.

### **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 4**

#### **3.1. Материалы, приборы, инструменты:**

- образцы древесины цилиндрической формы диаметром  $(15 \pm 0,3)$  мм и высотой  $(5 \pm 0,1)$  мм;
- графитовый порошок или алюминиевая пудра;
- измеритель теплопроводности ИТ-л-400;
- весы аналитические (точность определения массы – 0,01 г);
- толщиномер (штангенциркуль).

#### **3.2. Подготовка образца.**

3.2.1. Получают у преподавателя испытуемый образец. Порода древесины должна быть такой же, как у образца, использованного в лабораторной работе № 3.

3.2.2. Используя толщиномер (штангенциркуль), измеряют диаметр  $d$  и высоту  $h$  образца. Точность измерения – 0,01 мм.

3.2.3. Образец взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,01 г.

3.2.4. Определяют объем и плотность испытуемого образца по формулам (26) и (27). Рассчитывают площадь поперечного сечения образца  $S$  по формуле

$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (28)$$

3.2.5. Результаты измерений и расчетов заносят в таблицу, аналогичную табл. 7. В нее дополнительно вносят значение площади поперечного сечения образца  $S$ , м<sup>2</sup>.

3.2.6. Торцы образца натирают графитовым порошком (алюминиевой пудрой) для улучшения теплового контакта со стержнем и контактной пластиной (рис. 5).

#### **3.3. Проведение испытания.**

3.3.1. Определение коэффициента теплопроводности проводят на измерителе теплопроводности ИТ-л-400, внешний вид которого аналогичен измерителю теплоемкости ИТ-с-400 (рис. 6).

3.3.2. Поднимают верхнюю половину корпуса измерительной ячейки 1. Устанавливают образец на контактную пластину, а стержень – на контактные иглы термопары. Закрывают измерительную ячейку, опуская верхнюю половину корпуса.

3.3.3. Включают измеритель теплопроводности и микровольтнаноамперметр 2 нажатием кнопок «Сеть» 3 и 4. Переключатель «Измерение» 5 ставят в положение « $t_c$ », а переключатель «Температура» 6 – в положение «0». Прибор прогревают в течение 20–30 мин.

3.3.4. Кнопкой «Нагрев» 7 включают нагреватель, а рукояткой 8 устанавливают на вольтметре 9 начальное напряжение 40 В. Переключатель 6 переводят в положение 25°C. Отжатием кнопки «АРР» 12 включают микровольтнаноамперметр.

3.3.5. При достижении заданного значения температуры световой указатель микровольтнаноамперметра подходит к нулевой отметке. При ее достижении переключатель «Измерение» 5 быстро переводят в положение « $P_T$ ». Световой указатель при этом отклоняется на несколько делений от нулевой отметки. Фиксируют это количество делений ( $\Delta T_T$ ) и быстро переводят переключатель 5 в положение « $P_0$ ». Также фиксируют число делений отклонения от нуля ( $\Delta T_0$ ) и возвращают переключатель 5 в положение « $t_c$ ». Числа зафиксированных делений заносят в соответствующие столбцы табл. 9.

Таблица 9

**Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности**

| $t, ^\circ\text{C}$ | Постоянные прибора |                             |                                | $\Delta T_T$ ,<br>дел. | $\Delta T_0$ ,<br>дел. | $C_o$ ,<br>Дж/°C | $\sigma$ | $P_o$ ,<br>м²·°C/Вт | $\lambda$ ,<br>Вт/(м·°C) |
|---------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|------------------|----------|---------------------|--------------------------|
|                     | $C_c$ ,<br>Дж/°C   | $r_T \cdot 10^2$ ,<br>Вт/°C | $P_K \cdot 10^4$ ,<br>м²·°C/Вт |                        |                        |                  |          |                     |                          |
| 25                  | 15,86              | 6,15                        | 7,6                            |                        |                        |                  |          |                     |                          |
| 50                  | 16,54              | 7,02                        | 6,1                            |                        |                        |                  |          |                     |                          |
| 75                  | 16,54              | 7,02                        | 6,1                            |                        |                        |                  |          |                     |                          |
| 100                 | 16,87              | 8,26                        | 5,6                            |                        |                        |                  |          |                     |                          |
| 125                 | 16,87              | 8,26                        | 5,6                            |                        |                        |                  |          |                     |                          |

3.3.6. Переключатель 6 последовательно переводят на значения температуры 50, 75, 100 и 125°C. Для каждого из них выполняют действия, описанные в п. 3.3.5.

3.3.7. После проведения последнего измерения (при температуре 125°C) рукояткой 8 выводят вольтметр 9 в нулевое положение. Кнопкой 7 отключают нагреватель. Арретируют микровольтнаноамперметр нажатием кнопки «АРР» 12. Приборы отключают от сети с помощью кнопок 3 и 4.

3.3.8. Поднимают верхнюю часть корпуса измерительной ячейки 1. Оставляют ее в таком положении для охлаждения до

комнатной температуры. Извлекают испытуемый образец, а измерительную ячейку закрывают.

### **3.4. Определение коэффициента теплопроводности по экспериментальным данным.**

3.4.1. Используя результаты лабораторной работы № 3, по формуле (25) рассчитывают полную теплоемкость испытуемого образца для каждого значения температуры.

3.4.2. По формуле (24) для каждого значения температуры находят значения поправки  $\sigma$ , а по формуле (22) рассчитывают тепловое сопротивление испытуемого образца  $R_0$ .

3.4.3. Коэффициент теплопроводности испытуемого образца рассчитывают по формуле (23).

3.4.4. Результаты всех расчетов заносят в табл. 9.

### **3.5. Определение коэффициента теплопроводности с помощью диаграммы.**

3.5.1. По диаграмме приложения 5 для каждого значения температуры находят значения коэффициента теплопроводности древесины березы поперек волокон  $\lambda_n$ .

3.5.2. Для породы древесины и структурного направления испытуемого образца по таблицам приложения 6 определяют коэффициенты, учитывающие базисную плотность древесины  $k_p$  и направление теплового потока  $k_x$ .

3.5.3. Для каждого значения температуры рассчитывают коэффициент теплопроводности по формуле 12. Результаты определений и расчетов заносят в табл. 10.

Таблица 10

#### **Определение коэффициента теплопроводности по диаграмме**

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda_n, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ | $k_p$ | $k_x$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ |
|---------------------|------------------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------------|
| 25                  |                                                      |       |       |                                                    |
| 50                  |                                                      |       |       |                                                    |
| 75                  |                                                      |       |       |                                                    |
| 100                 |                                                      |       |       |                                                    |

### **3.6. Анализ полученных результатов.**

Сопоставляют значения коэффициента теплопроводности, полученные экспериментально (табл. 9) и с помощью диаграммы (табл. 10). Отмечают возможные расхождения. Делают вывод о точности использованного метода определения коэффициента теплопроводности.

### 3.7. Определение коэффициента температуропроводности.

3.7.1. В табл. 11 заносят результаты определения удельной теплоемкости (лабораторная работа № 3, табл. 8) и коэффициента теплопроводности (табл. 9).

Таблица 11

Определение коэффициента температуропроводности

| $t, ^\circ\text{C}$ | $c, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ | $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$ | $a, \text{м}^2/\text{с}$ |
|---------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 50                  |                                               |                                                    |                              |                          |
| 75                  |                                               |                                                    |                              |                          |
| 100                 |                                               |                                                    |                              |                          |
| 125                 |                                               |                                                    |                              |                          |

3.7.2. Плотность древесины рассчитывают как среднее арифметическое двух определений плотности, проведенных в лабораторных работах № 3 и 4.

3.7.3. Коэффициент температуропроводности рассчитывают по формуле (13). Результаты расчетов заносят в табл. 11.

## 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие параметры относятся к тепловым свойствам древесины?
2. Что такое удельная теплоемкость? В каких единицах она измеряется?
3. От чего и каким образом зависит удельная теплоемкость древесины?
4. Как пользоваться диаграммой удельной теплоемкости древесины?
5. Чему равен коэффициент теплопроводности? В каких единицах он измеряется?
6. От чего и каким образом зависит коэффициент теплопроводности древесины?
7. Как, пользуясь диаграммой, определить коэффициент теплопроводности для любой породы древесины и в любом ее структурном направлении?
8. Чему равен коэффициент температуропроводности? В каких единицах он измеряется?

## **НАГРЕВАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ В ВОДЕ**

*Цель работы:* изучение закономерностей конвективного нагревания древесины при тепловой обработке в воде.

### **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

#### **1.1. Способы тепловой обработки древесины.**

Тепловая обработка – это нагревание древесины и поддержание ее температуры на заданном уровне в течение определенного времени. Тепловая обработка проводится с целью уменьшения твердости древесины и, как следствие этого, снижения усилий, повышения качества последующего резания.

Все существующие способы тепловой обработки могут быть классифицированы по следующим признакам: доминирующему виду теплообмена, применяемому агенту обработки и виду используемого оборудования. На конвективном теплообмене основаны следующие способы тепловой обработки:

1) тепловая обработка в открытых бассейнах в воде, имеющей температуру до 20°C;

2) тепловая обработка водой при температуре 40–90°C в специальных бассейнах. Такая обработка называется *провариванием*, а бассейны – варочными;

3) тепловая обработка насыщенным водяным паром, называемая *пропариванием*;

4) тепловая обработка горячим воздухом или топочными газами.

На других видах теплообмена основаны кондуктивная, радиационная и диэлектрическая тепловые обработки. Выбор одного из перечисленных способов обработки определяется технологической целью процесса и допустимым характером влагообмена (допускается или нет изменение влажности древесины).

На деревообрабатывающих предприятиях широкое распространение получила тепловая обработка древесины в воде. Обработка в открытых бассейнах проводится, как правило, с целью

оттаивания древесного сырья перед механической обработкой. Она особенно целесообразна на лесопильных заводах, где сортировка и хранение бревен перед распиловкой могут осуществляться в воде. Как уже указывалось, температура воды в открытых бассейнах не превышает  $20^{\circ}\text{C}$ , обычно составляя  $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$ .

В некоторых технологических процессах деревообработки твердость древесины должна быть снижена в большей степени, чем это может обеспечить оттаивание. Так, например, при изготовлении лущеного и строганого шпона древесное сырье должно быть подогрето до более высокой температуры –  $30\text{--}60^{\circ}\text{C}$ . В таких случаях применяется проваривание древесины. Оно может осуществляться по мягкому и жесткому режимам. *Мягкий режим* характеризуется температурой обрабатывающей среды  $35\text{--}45^{\circ}\text{C}$  и большой длительностью обработки. Достоинство мягкого режима – равномерная температура обработанной древесины и, как следствие этого, высокое качество получаемого шпона. Недостаток – потребность в больших производственных площадях. *Жесткий режим* предусматривает высокую температуру среды, достигающую  $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$ , и малые сроки обработки. Древесина, обработанная по жесткому режиму, имеет неодинаковую температуру по сечению. После выгрузки из бассейна она выдерживается в помещении для выравнивания температурного поля. Достоинством жесткого режима тепловой обработки является существенное по сравнению с мягким режимом уменьшение задействованных производственных площадей, недостатком – снижение качества получаемого шпона.

Методика расчета процесса конвективного нагревания древесины зависит от агрегатного состояния содержащейся в ней воды. Возможны два варианта: а) нагревание древесины без изменения агрегатного состояния воды (начальная температура выше  $0^{\circ}\text{C}$ ); б) нагревание древесины с одновременным ее оттаиванием (начальная температура ниже  $0^{\circ}\text{C}$ ).

### **1.2. Конвективное нагревание древесины без изменения агрегатного состояния воды.**

При конвективном нагревании древесины имеет место сложный теплообмен, т. е. параллельно протекают два процесса: теплообмен материала с окружающей средой и теплопроводность материала. Интенсивность конвективного теплообмена на границе твердого тела и обрабатывающей среды описывается уравнением Ньютона:

$$q = \alpha \cdot (t_c - t_n), \quad (29)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_c$  – температура обрабатывающей среды, °C;  $t_n$  – температура поверхности тела, °C.

Интенсивность перемещения тепла вглубь материала за счет теплопроводности описывается уравнением

$$q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx}, \quad (30)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);  $dt / dx$  – изменение температуры по координате  $x$  (градиент температуры в материале), °C/м.

Знак «–» в уравнении (30) показывает, что направление теплового потока обратно направлению температурного градиента.

Существуют две разновидности сложного теплообмена – стационарный и нестационарный. *Стационарный теплообмен* характеризуется постоянством во времени температурного поля. Примером его может служить передача тепла от одной среды с постоянной температурой  $t_1$  к другой среде с постоянной температурой  $t_2$  через плоскую стенку. Плотность теплового потока в этом случае определяется уравнением

$$q = k \cdot (t_1 - t_2), \quad (31)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Коэффициент теплопередачи при этом равен

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (32)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплообмена на первой и второй поверхностях стенки, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $S$  – толщина стенки, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·°C).

*Нестационарный теплообмен* характеризуется температурным полем, переменным во времени и пространстве. К процессам нестационарного теплообмена относится, в частности, и нагревание древесины в воде. Изменение температуры тела при нестационарном теплообмене описывается дифференциальным уравнением Фурье:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \left( \frac{d^2t}{dx^2} + \frac{d^2t}{dy^2} + \frac{d^2t}{dz^2} \right), \quad (33)$$

где  $\tau$  – время, с;  $c$  – удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·°С);  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Уравнение (33) упрощается для одномерных тел. *Одномерным* называется тело, размеры и форма которого могут быть охарактеризованы одним линейным размером. Примерами одномерных тел могут быть шар, бесконечная пластина и цилиндр. В этих случаях уравнение Фурье принимает вид

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{d^2t}{dx^2} = a \cdot \frac{d^2t}{dx^2}, \quad (34)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Средой для нагревания древесных сортиментов обычно являются насыщенный водяной пар и вода. Их использование характеризуется интенсивным поверхностным теплообменом. Перепад температуры между поверхностью тела и средой в этом случае очень мал:

$$t_{\text{п}} \approx t_{\text{с}}. \quad (35)$$

Решением уравнения (34) при выполнении граничного условия (35) является функция

$$\Theta = f\left(\frac{x}{R}, F_0\right), \quad (36)$$

где  $\Theta$  – безразмерная температура произвольной точки тела;  $R$  – определяющий размер тела (половина толщины пластины, радиус цилиндра и т. д.), м;  $F_0$  – критерий Фурье.

Для определения перечисленных выше параметров пользуются равенствами:

$$\Theta = \frac{t_{\text{с}} - t}{t_{\text{с}} - t_0}; \quad (37)$$

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{R^2}. \quad (38)$$

Аналитическое выражение функции (36) имеет форму бесконечного ряда, является очень сложным и неудобным для выполнения практических расчетов. Поэтому в практике тепловой обработ-

ки древесины широко используются специальные номограммы. Они составляются для различных частных случаев разных обрабатывающих агентов и видов обрабатываемых сортиментов. В приложении 7 приведены номограммы, связывающие безразмерную температуру, критерий Фурье и безразмерную координату ( $x / R$ ), для неограниченной пластины и бесконечного цилиндра при нагревании их в жидкости или насыщенном водяном паре. Пользуясь этими номограммами, легко рассчитать температуру в любой точке сортимента в любой заданный момент тепловой обработки.

### 1.3. Конвективное нагревание древесины с одновременным оттаиванием.

В замороженной древесине влага (свободная – полностью, а связанная – частично) находится в твердом агрегатном состоянии. При ее нагревании температура изменяется в соответствии с кривыми, показанными на рис. 7.

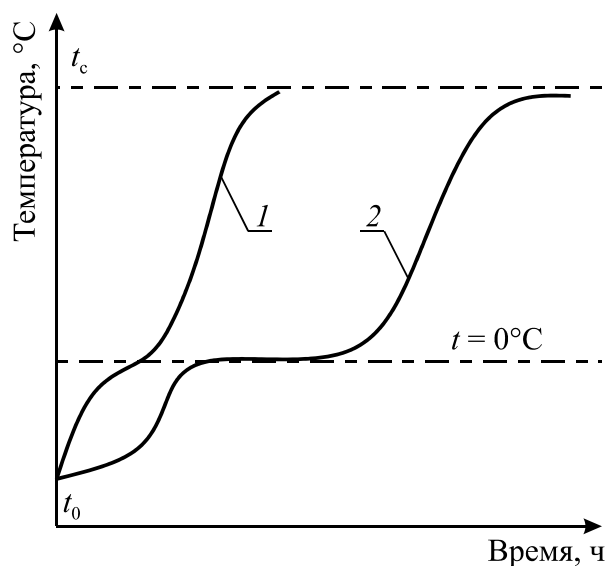


Рис. 7. Изменение температуры древесины при нагревании с одновременным оттаиванием:  
1 – поверхностный слой; 2 – внутренний слой

В начале процесса температура повышается от начальной отрицательной величины  $t_0$  до  $0^\circ\text{C}$ . Затем она остается на этом уровне до тех пор, пока вода в наружной (по отношению к рассматриваемой точке) зоне переходит в жидкое состояние. После завершения этого процесса температура вновь начинает повышаться, приближаясь к температуре обрабатывающей среды. Таким образом, теплота,

поступающая от среды к древесине, расходуется, во-первых, на ее оттаивание, во-вторых, на нагрев оттаявшей древесины. Соответственно при выполнении практических расчетов технологического процесса нагревания мерзлой древесины должны быть решены две задачи: 1) определить время, необходимое для оттаивания сортамента на заданную глубину; 2) определить время, необходимое для доведения определенной точки сортамента до требуемой положительной температуры после его полного оттаивания.

В начале процесса температура повышается от начальной отрицательной величины  $t_0$  до  $0^\circ\text{C}$ . Затем она остается на этом уровне до тех пор, пока вода в наружной (по отношению к рассматриваемой точке) зоне переходит в жидкое состояние. После завершения этого процесса температура вновь начинает повышаться, приближаясь к температуре обрабатывающей среды. Таким образом, теплота, поступающая от среды к древесине, расходуется, во-первых, на ее оттаивание, во-вторых, на нагрев оттаявшей древесины. Соответственно, при выполнении практических расчетов технологического процесса нагревания мерзлой древесины должны быть решены две задачи: 1) определить время, необходимое для оттаивания сортамента на заданную глубину; 2) определить время, необходимое для доведения определенной точки сортамента до требуемой положительной температуры после его полного оттаивания.

Можно показать [1, с. 90], что время оттаивания цилиндрического сортамента на заданную глубину рассчитывается по формуле (39), а полного оттаивания – по формуле (40):

$$\tau = \left( \frac{D^2 - d^2}{16} - \frac{d^2}{8} \cdot \ln \frac{D}{d} \right) \cdot \frac{q_{\text{от}}}{\lambda \cdot t_c}; \quad (39)$$

$$\tau_{\text{по}} = \frac{D^2}{16} \cdot \frac{q_{\text{от}}}{\lambda \cdot t_c}, \quad (40)$$

где  $D$  – диаметр сортамента, м;  $d$  – диаметр неоттаявшей зоны сортамента, м;  $q_{\text{от}}$  – удельный расход теплоты на оттаивание единицы объема древесины, Дж/м<sup>3</sup>.

Удельный расход теплоты на оттаивание древесины находят, используя следующее выражение:

$$q_{\text{от}} = \rho \cdot c_{(-)} \cdot (-t_0) + \rho_b \cdot \frac{W - W_{\text{сж}}}{100} \cdot \gamma, \quad (41)$$

где  $\rho$  – плотность древесины,  $\text{кг/м}^3$ ;  $c_{(-)}$  – удельная теплоемкость замороженной древесины,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $t_0$  – начальная температура замороженной древесины,  $^\circ\text{C}$ ;  $\rho_b$  – базисная плотность древесины,  $\text{кг/м}^3$ ;  $W$  – влажность древесины, %;  $W_{\text{сж}}$  – относительное содержание связанной воды, оставшейся в замороженной древесине в жидком состоянии, % (см. прил. 16);  $\gamma$  – скрытая теплота плавления льда,  $\gamma = 335 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ .

Время, необходимое для доведения температуры в той или иной зоне сортимента до требуемой положительной величины после его полного оттаивания, рассчитывают по формуле

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{0,096 \cdot D^2}{a} \cdot \lg \left[ \frac{t_c}{t_c - t_x} \cdot \left( 1 - \frac{d_x}{D} \right) \right], \quad (42)$$

где  $t_x$  – температура, до которой должна быть нагрета древесина в заданной точке,  $^\circ\text{C}$ ;  $d_x$  – диаметр воображаемого цилиндра, на поверхности которого лежит заданная точка, м.

Как уже указывалось, нагревание древесины в воде – нестационарный процесс, характеризующийся изменением температурного поля во времени. С учетом зависимости удельной теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности от температуры возникает необходимость введения понятия расчетной температуры, для которой определяют указанные тепловые свойства древесины.

При выполнении вычислений по формулам (35)–(38), целью которых является определение температуры нагревания древесины без изменения агрегатного состояния воды, расчетную температуру находят, пользуясь выражением

$$t_p = \frac{t_c + t_0}{2}. \quad (43)$$

Когда требуется определить время оттаивания древесины на любую глубину по формулам (39) и (40), расчетную температуру вычисляют по формуле

$$t_p = \frac{t_c}{2}. \quad (44)$$

Наконец, при определении дополнительного времени нагрева круглого сортимента до требуемой температуры по формуле (42) расчетную температуру находят по формуле

$$t_p = \frac{t_c \cdot (2 + d_x / D) + t_x}{4}. \quad (45)$$

Теплоемкость замороженной древесины  $c_{(-)}$  находят по диаграмме приложения 4 для температуры, рассчитанной следующим образом:

$$t_p = \frac{t_0}{2}. \quad (46)$$

## **2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 5**

### **2.1. Материалы, приборы, инструменты:**

– образец древесины цилиндрической формы диаметром  $D = 60\text{--}120$  мм, длиной  $L > 5D$ , имеющий начальную температуру  $t_0 > 0^\circ\text{C}$ ;

- термостат жидкостный 5 ОК-20/0.05-03;
- система измерения температуры внутри древесины;
- весы технические (точность определения массы – 1 г);
- секундомер.

### **2.2. Лабораторная установка.**

Лабораторная установка для нагревания древесины, а также нагреваемый образец показаны на рис. 8.

Установка состоит из жидкостного термостата 1 и системы измерения температуры внутри древесины, включающей термопары 6 и потенциометр 8. Термостат оснащен мешалкой 2, электронагревателем 3, термометром 4 и регулятором температуры 5, которые позволяют поддерживать температуру воды на заданном уровне и контролировать ее текущее значение. Питание термостата и потенциометра осуществляется от сети с напряжением 220 В. В качестве контрольного образца используется цилиндрический чурок диаметром  $D = 60\text{--}120$  мм и длиной  $L > 5D$ . В чуреке просверлены два отверстия диаметром 4 мм: по оси и вдоль оси на расстоянии  $R / 2$  от боковой поверхности. Глубина отверстий –  $L / 2$ .

О контрольном образце должна быть известна следующая информация: порода древесины, масса в абсолютно сухом состоянии и начальная температура, которая должна быть больше  $0^\circ\text{C}$ . При размещении контрольного образца в термостате уровень жидкости должен быть ниже верхнего торца на 10–20 мм.

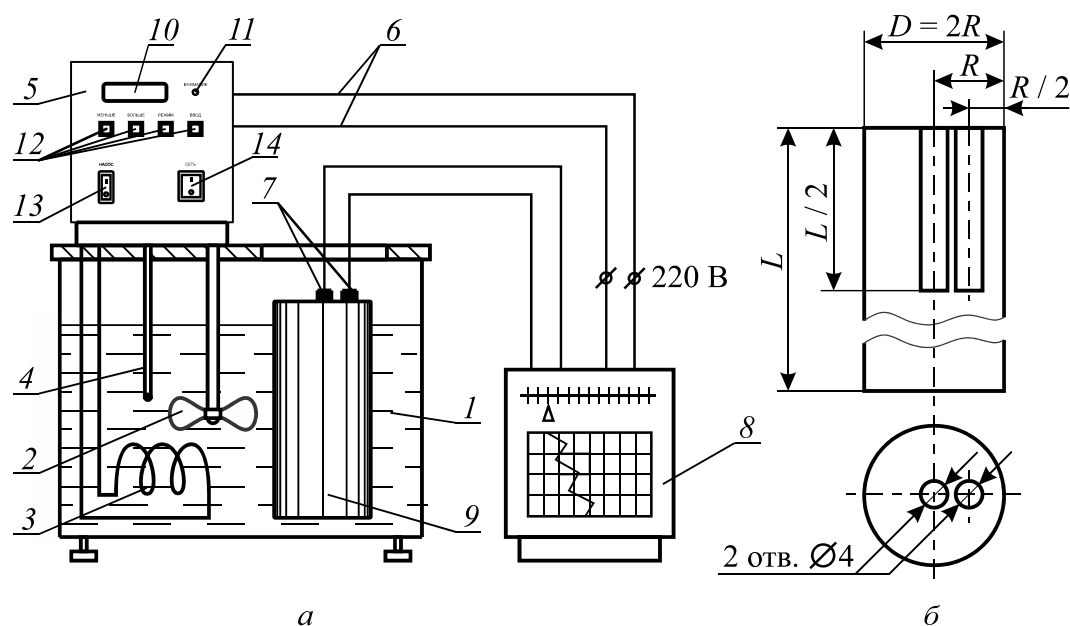


Рис. 8. Схема лабораторной установки (а) и контрольный образец (б):

- 1 – жидкостный термостат; 2 – мешалка; 3 – электронагреватель;  
 4 – термометр; 5 – регулятор температуры; 6 – термодары;  
 7 – деревянные пробки; 8 – потенциометр; 9 – контрольный образец;  
 10 – дисплей; 11 – LED-индикатор «Внимание»; 12 – кнопки управления  
 (слева – направо: «Меньше», «Больше», «Режим», «Ввод»);  
 13 – кнопка включения/выключения насоса откачки жидкости из резервуара;  
 14 – кнопка включения/выключения электросети

## 2.3. Построение экспериментальных кривых изменения температуры древесины при нагревании в воде.

2.3.1. Включают термостат и настраивают его на заданную температуру, которую указывает преподаватель. Настройка производится при помощи кнопок управления 12. Сначала следует нажать кнопку «Ввод» и удерживать ее до тех пор, пока подсветка экрана не загорится и кратковременно не появится символ «\*». Для регулировки температуры в сторону увеличения многократно или однократно нажимают кнопку «Больше» с удержанием ее в таком положении до момента выбора необходимого значения. Аналогичным образом производят уменьшение заданного значения температуры, но используют для этого кнопку «Меньше». Для подтверждения заданной температуры нажимают кнопку «Ввод» и удерживают до появления символа «\*». При последующем нажатии кнопки «Режим» произойдет смена отображаемого показателя температуры на значение «В термостате:». На экране отобразится текущее значение

температуры, при достижении установленного значения температура будет автоматически поддерживаться на постоянном уровне.

Опыт начинают после достижения водой требуемого значения температуры, о чем судят по показаниям на дисплее регулятора температуры 5.

2.3.2. Контрольный образец взвешивают на технических весах с точностью до 1 г. Зная его массу в абсолютно сухом состоянии (указывает преподаватель), рассчитывают начальную влажность древесины по формуле (4). При использовании образца, не имеющего дефектов сушки, влажность допускается измерять электро-влажномером (см. лабораторную работу № 1).

2.3.3. В отверстия образца на полную их глубину вводят термодпары и фиксируют их положение с помощью деревянных или эластомерных (резиновых) пробок 7. Термодпары подключают к потенциометру.

2.3.4. Образец осторожно опускают в термостат, погружая его в воду. При этом должно быть исключено попадание воды на верхний торец. В погруженном состоянии образец удерживают с помощью крепления или груза.

2.3.5. После установки образца включают потенциометр и секундомер. Изменение температуры в древесине фиксируют с помощью самописца потенциометра или визуально. Во втором случае показания со шкалы потенциометра снимают через каждые 5–10 мин. Значения температуры, определяемые обеими термодпарами, записывают в табл. 12.

Таблица 12

Изменение температуры древесины \_\_\_\_\_  
влажностью \_\_\_\_\_% в воде с температурой \_\_\_\_°C

| Номер замера | Время нагрева, мин | Температура, °C               |         |             |         |
|--------------|--------------------|-------------------------------|---------|-------------|---------|
|              |                    | определенная экспериментально |         | расчетная   |         |
|              |                    | $x = R / 2$                   | $x = R$ | $x = R / 2$ | $x = R$ |
| 1            | 0                  |                               |         |             |         |
| 2            | 10                 |                               |         |             |         |
| ...          | ...                |                               |         |             |         |

2.3.6. Опыт прекращают после достижения внутри образца температуры, отличающейся от температуры обрабатывающей среды не более чем на 5°C, или по указанию преподавателя.

2.3.7. По данным табл. 12 аналогично рис. 7 строят графические зависимости изменения температуры древесины во времени.

## 2.4. Построение расчетных кривых изменения температуры древесины при нагревании в воде.

2.4.1. Определяют расчетную температуру древесины по формуле (43).

2.4.2. Используя диаграммы приложений 2, 4–6, находят плотность, удельную теплоемкость древесины заданной породы, а также номинальное значение коэффициента теплопроводности древесины березы поперек волокон. С помощью формулы (12) рассчитывают коэффициент теплопроводности для заданной породы древесины в радиальном направлении.

2.4.3. Рассчитывают коэффициент температуропроводности по формуле (13).

2.4.4. Для различного времени нагрева, указанного в табл. 12, рассчитывают значения критерия Фурье по формуле (38).

2.4.5. Используя номограмму приложения 7, находят для различного времени нагрева безразмерную температуру в точках сортифта, удаленных от поверхности на расстояние  $R/2$  и  $R$ .

2.4.6. Применив формулу (37), определяют расчетные значения температуры, которые заносят в табл. 13. По результатам расчетов строят графические зависимости температуры древесины от времени на рисунке, который был сделан при выполнении п. 2.3.7.

Таблица 13

Изменение температуры замороженной древесины \_\_\_\_\_  
влажностью \_\_\_\_% в воде с температурой \_\_\_\_°C

| Номер замера | Время нагрева, мин | Температура, °C |         |
|--------------|--------------------|-----------------|---------|
|              |                    | $x = R/2$       | $x = R$ |
| 1            | 0                  |                 |         |
| 2            | 10                 |                 |         |
| ...          | ...                |                 |         |

2.4.7. Сопоставляют расчетные и экспериментальные кривые. Анализируют причины их возможного несовпадения.

## 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 6

### 3.1. Материалы, приборы, инструменты:

– образец древесины цилиндрической формы диаметром  $D = 60\text{--}120$  мм длиной  $L > 5D$ , имеющий начальную температуру  $t_0 < 0^\circ\text{C}$ ;

- морозильная камера;
- водяной термостат;
- система измерения температуры внутри древесины;
- весы технические (точность определения массы – 1 г);
- секундомер.

### **3.2. Лабораторная установка.**

Лабораторная установка для оттаивания древесины и контрольные образцы используются такие же, как и в работе № 5. Схема лабораторной установки и контрольный образец изображены на рис. 8. Отличие состоит в том, что начальная температура контрольного образца должна быть меньше 0°C.

### **3.3. Экспериментальное определение времени оттаивания мерзлой древесины.**

3.3.1. Включают термостат и настраивают его на температуру, заданную преподавателем. Опыт начинают после достижения водой требуемого значения температуры, о чем судят по показаниям термометра термостата.

3.3.2. Из морозильной камеры извлекают контрольный образец и быстро взвешивают на технических весах с точностью до 1 г.

3.3.3. Проделывают действия согласно п. 2.3.3–2.3.7 лабораторной работы № 5. Записи ведут в табл. 13.

3.3.4. Выясняют у преподавателя температуру в морозильной камере и массу образца в абсолютно сухом состоянии. По формуле (4) рассчитывают начальную влажность древесины.

3.3.5. По графическим зависимостям определяют время оттаивания контрольного образца на глубину от поверхности  $R/2$  и  $R$ , а также время нагрева этих же точек сортамента до температуры, которую указывает преподаватель ( $t_x$ ). Результаты определений заносят в табл. 14.

### **3.4. Аналитическое определение времени оттаивания древесины и дополнительного времени нагрева до заданной температуры.**

3.4.1. По формуле (46) находят значение расчетной температуры. Для этой температуры, пользуясь приложением 4, определяют удельную теплоемкость замороженной древесины.

3.4.2. Для начальной температуры древесины (температуры в морозильной камере) определяют относительное содержание связанной воды, оставшейся в замороженной древесине в жидком состоянии.

Таблица 14

**Определение времени оттаивания и дополнительного нагрева  
древесины \_\_\_\_\_ влажностью \_\_\_\_\_ % в воде с температурой \_\_\_\_\_ °С**

| Определяемый параметр                                                                                                                         | Значение параметра |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|
|                                                                                                                                               | экспериментальное  | расчетное |
| 1. Время оттаивания на глубину _____ мм, мин                                                                                                  |                    |           |
| 2. Время полного оттаивания, мин                                                                                                              |                    |           |
| 3. Время дополнительного нагрева до достижения в точке, удаленной от поверхности сортимента на расстояние _____ мм, температуры _____ °С, мин |                    |           |
| 4. Время дополнительного нагрева до достижения в центре сортимента температуры _____ °С, мин                                                  |                    |           |

3.4.3. По приложению 1 определяют базисную плотность древесины, а по диаграмме приложения 2 – фактическое значение плотности древесины для влажности, определенной в п. 3.3.4.

3.4.4. Пользуясь формулой (41), рассчитывают удельный расход теплоты на оттаивание древесины.

3.4.5. Определяют значение расчетной температуры по формуле (44). Для этой температуры, используя диаграмму приложения 5, находят номинальное значение коэффициента теплопроводности древесины березы поперек волокон. С помощью формулы (12) рассчитывают коэффициент теплопроводности исследуемой породы древесины в радиальном направлении.

3.4.6. По формулам (39) и (40) рассчитывают время оттаивания сортимента на глубину  $R / 2$  и полного его оттаивания (на глубину  $R$ ).

3.4.7. По формуле (45) находят значение температуры для последующего определения дополнительного времени нагрева древесины до заданной преподавателем температуры  $t_x$ . Расчет выполняют дважды: для точек сортимента, удаленных от поверхности на расстояние  $R / 2$  и  $R$ .

3.4.8. Для двух значений расчетной температуры, используя диаграммы приложений 2, 4 и 5, находят плотность, удельную теплоемкость древесины заданной породы, а также номинальное значение коэффициента теплопроводности древесины березы поперек волокон. По формуле (12) рассчитывают значения коэффициента теплопроводности заданной породы древесины в радиальном направлении.

3.4.9. По формуле (13) рассчитывают значение коэффициента температуропроводности, а по формуле (42) – время дополнительного нагрева древесины до заданной преподавателем температуры  $t_x$  в точках, удаленных от поверхности сортимента на расстояние  $R / 2$  и  $R$ . Результаты расчетов заносят в табл. 14.

3.4.10. Сопоставляют расчетные и экспериментально полученные значения времени оттаивания и дополнительного нагрева сортимента. Анализируют причины их возможного несовпадения.

#### **4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Что такое тепловая обработка древесины? С какой целью она проводится?
2. Какие известны виды тепловой обработки?
3. Что такое проваривание? Чем отличаются мягкий и жесткий режимы проваривания?
4. Какими уравнениями описываются процессы конвективного теплообмена на границе твердого тела и обрабатывающей среды, теплопроводности?
5. Что такое стационарный и нестационарный теплообмен?
6. Как записывается уравнение Фурье для многомерных и одномерных тел? Какие тела называются одномерными?
7. Какая функция является решением уравнения Фурье?
8. Как определить безразмерную температуру?
9. Как изменяется температура при нагревании замороженной древесины?
10. Из чего складываются затраты теплоты на оттаивание древесины?
11. Как рассчитать продолжительность оттаивания древесины на заданную глубину, полного оттаивания?
12. Как рассчитать время нагревания древесины в любой точке сортимента до заданной положительной температуры?

## **НАГРЕВАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ В НАСЫЩЕННОМ ПАРОМ ВОЗДУХЕ**

*Цель работы:* изучение процесса начального прогрева древесины перед сушкой.

### **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Начальный прогрев проводится с целью повышения влагопроводности древесины, что обеспечивает интенсивное перемещение влаги из центральной зоны сортиментов к поверхности. Прогрев должен осуществляться таким образом, чтобы повышение температуры материала не сопровождалось уменьшением его влажности. Преждевременное начало сушки непрогретых пиломатериалов может привести к нарушению целостности (растрескиванию) поверхностных слоев сортиментов.

Для того чтобы обеспечить интенсивный начальный прогрев древесины без снижения ее влажности, в камере создают высокую степень насыщенности обрабатывающего агента при повышенной, по сравнению с первой ступенью режима сушки, температуре. При прогреве пиломатериалов мягких хвойных пород рекомендуется поддерживать температуру, указанную в табл. 18 [1, с. 226]. При прогреве пиломатериалов других пород температура среды должна быть выше, чем на первой ступени режима сушки: для лиственницы и твердых лиственных пород – на  $5^{\circ}\text{C}$ , для мягких лиственных пород – на  $8^{\circ}\text{C}$ , но в обоих случаях не выше  $100^{\circ}\text{C}$ . Для создания высокой степени насыщенности обрабатывающего агента психрометрическую разность при прогреве поддерживают в пределах  $0,5\text{--}1,5^{\circ}\text{C}$ .

При указанных выше параметрах среды древесину выдерживают до тех пор, пока разность между температурой среды и температурой в центре доски не достигнет  $3^{\circ}\text{C}$ . Время, необходимое для достижения этой разности температур, колеблется от 1 до 8 ч в зависимости от породы и размеров пиломатериалов, начальной температуры древесины, размеров штабеля, скорости циркуляции

сушильного агента, категории режима сушки. Ориентировочно продолжительность начального прогрева составляет 1,0–1,5 ч летом и 1,5–2,0 ч зимой на каждый сантиметр толщины пиломатериала, считая от момента достижения в камере заданной температуры.

Продолжительность начального прогрева может быть определена расчетным путем с разной степенью точности. Более быстрый, но при этом и более приблизительный способ расчета – табличный. В этом случае продолжительность прогрева определяют по формуле

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_{\text{исх}} \cdot A_{\text{т}} \cdot A_{\text{в}} \cdot A_{\text{п}} \cdot A_{\text{ш}}, \quad (47)$$

где  $\tau_{\text{исх}}$  – исходная продолжительность начального прогрева в часах соснового пиломатериала влажностью 60% от начальной температуры  $-20-0^{\circ}\text{C}$  до  $77^{\circ}\text{C}$  на оси сортимента при следующих параметрах агента обработки:  $t_{\text{пр}} = 80^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t = 1^{\circ}\text{C}$ ;  $A_{\text{т}}$ ,  $A_{\text{в}}$ ,  $A_{\text{п}}$ ,  $A_{\text{ш}}$  – коэффициенты, учитывающие начальную температуру, влажность, породу древесины, а также ширину штабеля.

Значения  $\tau_{\text{исх}}$ ,  $A_{\text{т}}$  и  $A_{\text{в}}$  определяют по таблицам приложения 8. Коэффициент  $A_{\text{п}}$  принимают для сосны и ольхи – 1, ели, кедра, тополя и осины – 0,9, березы – 1,1, бука, лиственницы, дуба, ясеня – 1,2. Коэффициент  $A_{\text{ш}}$  при ширине штабеля до 2,0 м принимают равным 1, более 2 м – 1,15.

Значительно более точной является методика расчета продолжительности прогрева, основанная на закономерностях теплопроводности и конвективного нагревания древесины (раздел 1.2 лабораторных работ № 5–6). При выполнении расчета, однако, надо помнить следующее. Прямоугольные сортименты (доски, брусья) можно считать неограниченными пластинами, если отношение их толщины  $S$  к ширине  $B$  меньше, чем 0,3. При  $S / B \geq 0,3$  сортимент следует рассматривать как параллелепипед неограниченной длины. В этом случае вначале рассчитывают продолжительность нагрева неограниченной пластины толщиной  $S$ , а затем полученную величину умножают на коэффициент  $C_{\tau}$ , который вносит поправку на реальную форму сортимента:

$$\tau_{\text{пр}} = \tau \cdot C_{\tau}, \quad (48)$$

где  $\tau$  – время прогрева неограниченной пластины толщиной  $S$ , ч.

Коэффициент  $C_{\tau}$  находят по диаграмме, помещенной в приложении 9, в зависимости от безразмерной температуры на центральной оси сортимента и отношения  $S / B$ .

## 2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 2.1. Материалы, приборы, инструменты:

- отрезки досок разных пород древесины и толщины длиной  $L > 5S$ ;
- автоклав паровой LAC-3030E;
- система измерения температуры внутри древесины;
- весы технические (точность определения массы – 1 г);
- секундомер;
- линейка (рулетка);
- толщиномер (штангенциркуль).

### 2.2. Лабораторная установка.

Лабораторная установка для начального прогрева древесины представлена на рис. 9.

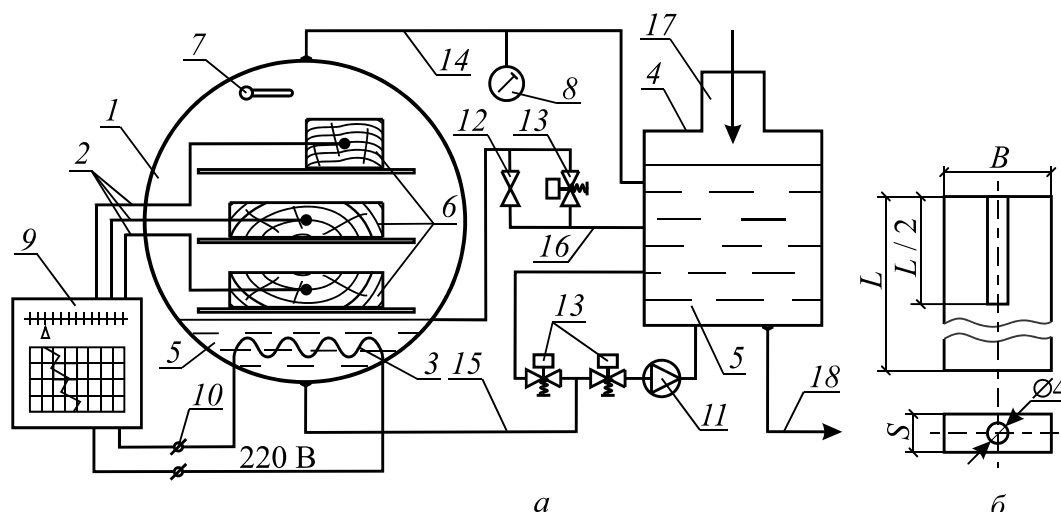


Рис. 9. Схема лабораторной установки (а) и контрольный образец (б):

- 1 – камера автоклава парового LAC-3030E; 2 – термопары;
- 3 – электронагреватель; 4 – маневровый резервуар; 5 – вода;
- 6 – контрольные образцы; 7 – датчик температуры среды; 8 – манометр;
- 9 – потенциометр; 10 – источник питания; 11 – магнитный насос;
- 12 – ручной вентиль; 13 – электромагнитные клапаны;
- 14 – трубка отвода пара; 15 – сливная трубка;
- 16 – трубка циркуляции воды между автоклавом и маневровым резервуаром;
- 17 – горловина заправки резервуара водой;
- 18 – трубка опорожнения резервуара

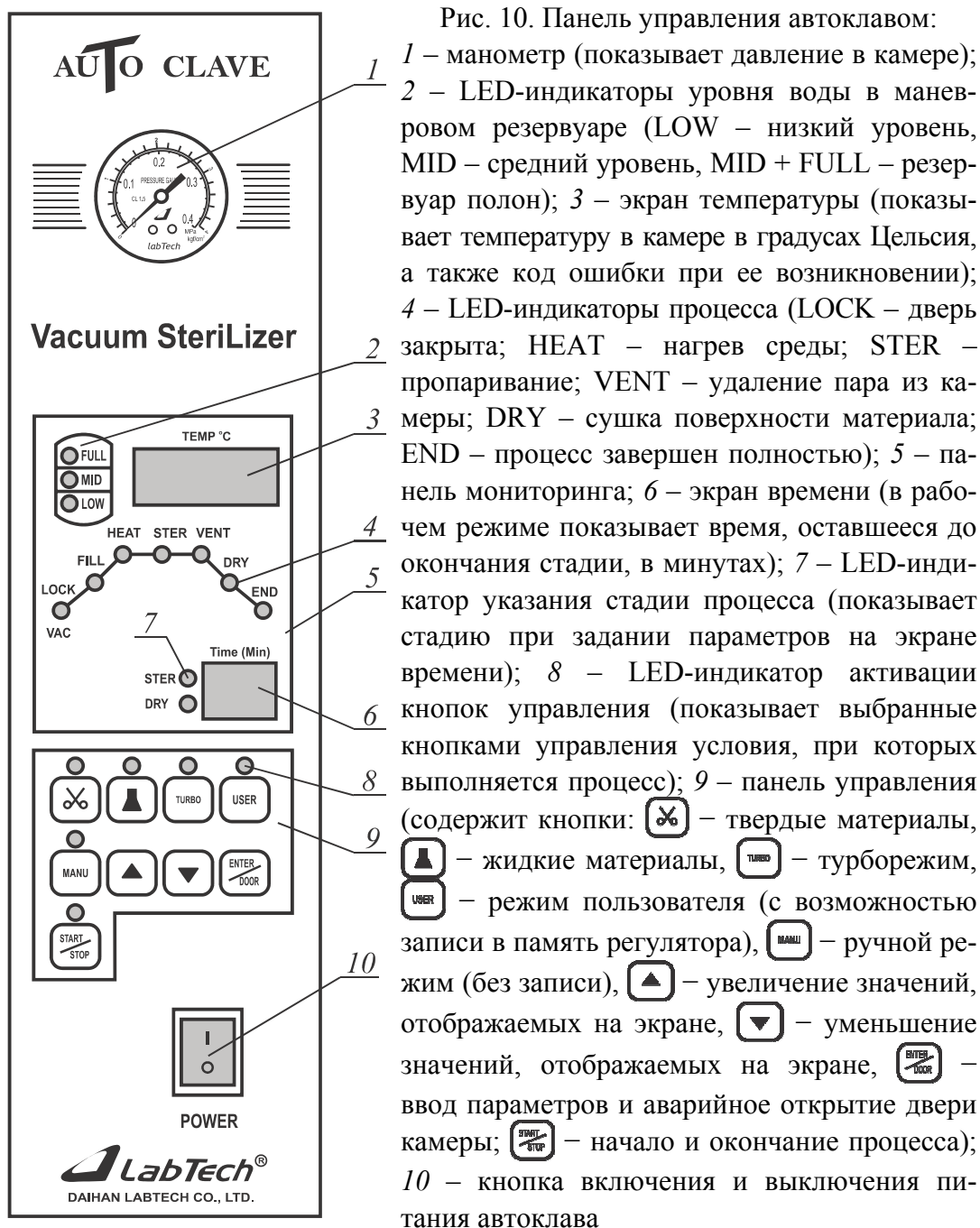
Основным элементом лабораторной установки является автоклав паровой LAC-3030E. Внутри герметичного корпуса камеры размеще-

ны электронагреватель 3, датчик температуры 7, перфорированные поддоны для укладки обрабатываемых контрольных образцов 6. Камера во время работы заполняется водой, уровень которой контролируется при помощи трубки 16. Для удобства и автоматизации заправки главного резервуара водой служит маневровый резервуар 4, воду в который через горловину 17 заливает пользователь (студент или преподаватель). В системе используется только дистиллированная вода. Осуществление контроля за состоянием среды в камере, а также уровнем воды производится регулятором, размещенным в корпусе автоклава правее камеры. Температуру внутри контрольных образцов 6 измеряют с помощью термопар 2, подключенных к потенциометру 9. Давление внутри камеры измеряется постоянно манометром 8, а температура среды – датчиком температуры среды 7 (термопарой), размещенными на панели управления автоклавом (рис. 10). Опорожнение камеры после работы осуществляется через трубку 15 при помощи электромагнитных клапанов 13 и насоса 11. При этом вода возвращается в маневровый резервуар 4. Излишки пара удаляются в тот же маневровый резервуар при помощи трубки 14. Опорожнение маневрового резервуара происходит по трубке 18. Питание автоклава и потенциометра осуществляется от сети с переменным напряжением 220 В.

В качестве контрольных образцов используют отрезки досок и заготовки различных пород древесины и толщины. По оси каждого образца высверлены отверстия диаметром 4 мм на глубину  $L / 2$  (рис. 10) для размещения в них термопар. О контрольных образцах должно быть известно: порода древесины, масса в абсолютно сухом состоянии.

### **2.3. Экспериментальное определение времени начального прогрева древесины.**

2.3.1. Включают автоклав и потенциометр. Для включения автоклава кроме подсоединения вилки к розетке следует установить предохранительный выключатель в положение «ON», который расположен на левой относительно фронтального вида стенке автоклава. Далее качающуюся клавишу (кнопку) включения/выключения автоклава переводят в положение «I». При этом она будет светиться, на панели автоклава загорятся индикаторы уровня воды в маневровом резервуаре 2, процесса 4 в стадии «LOCK», над любой кнопкой панели управления 9; экран температуры будет показывать текущую температуру в камере, а экран времени будет находиться в режиме ожидания и на нем будут отображаться два знака «тире».



2.3.2. Получают у преподавателя 2–3 контрольных образца различных пород древесины и размеров. Образцы взвешивают на технических весах с точностью до 1 г. Определяют толщину и ширину образцов. По формуле (4) рассчитывают начальную влажность древесины. Результаты проведенных измерений и расчетов заносят в табл. 15.

Таблица 15

**Характеристика контрольных образцов**

| Наименование параметров                 | Контрольные образцы |     |     |
|-----------------------------------------|---------------------|-----|-----|
|                                         | № 1                 | № 2 | № 3 |
| 1. Порода древесины                     |                     |     |     |
| 2. Размеры сечения, мм:                 |                     |     |     |
| – ширина                                |                     |     |     |
| – толщина                               |                     |     |     |
| 3. Масса в абсолютно сухом состоянии, г |                     |     |     |
| 4. Масса, г:                            |                     |     |     |
| – до прогрева                           |                     |     |     |
| – после прогрева                        |                     |     |     |
| 5. Влажность, %:                        |                     |     |     |
| – до прогрева                           |                     |     |     |
| – после прогрева                        |                     |     |     |

2.3.3. В отверстия образцов на полную глубину вставляют термопары (находятся в автоклаве) и фиксируют их положение деревянными пробками.

2.3.4. Контрольные образцы помещают в автоклав на перфорированные поддоны. Термопары подключают к потенциометру.

2.3.5. Закрывают автоклав при помощи сдвоенной ручки (качающаяся – для замыкания засова и вращающаяся – для герметизации камеры). Изображение ручки представлено на рис. 11. Качающуюся часть ручки переводят в положение «Close», после чего вращающуюся часть по часовой стрелке доворачивают до значительного сопротивления уплотнительных элементов (примерно 6,3 оборота).

2.3.6. Нажимают последовательно кнопки  и  на панели управления 9 (рис. 10), при помощи кнопок  и  устанавливают требуемую температуру, затем снова нажимают кнопку  для подтверждения и перехода к следующей установке. После этого загорится индикатор указания стадии процесса 7 «STER» и экран времени 6 отобразит задаваемую продолжительность пропаривания образцов (5–90 мин), которую можно изменять при помощи кнопок  и . Устанавливают максимально возможное значение. После установки необходимого значения снова нажимают кнопку , теперь загорится индикатор указания стадии процесса 7 «DRY», и экран времени 6 отобразит задаваемую продолжительность сушки образцов (1–90 мин), которую также можно изменить при помощи кнопок  и . Устанавливают минимально возможное значение.

Нажатием кнопки  подтверждают сделанные установки. Панель мониторинга 5 принимает исходный вид (как до установок), однако параметры уже приняты в память регулятора. Нажимают кнопку  и тем самым запускают процесс.

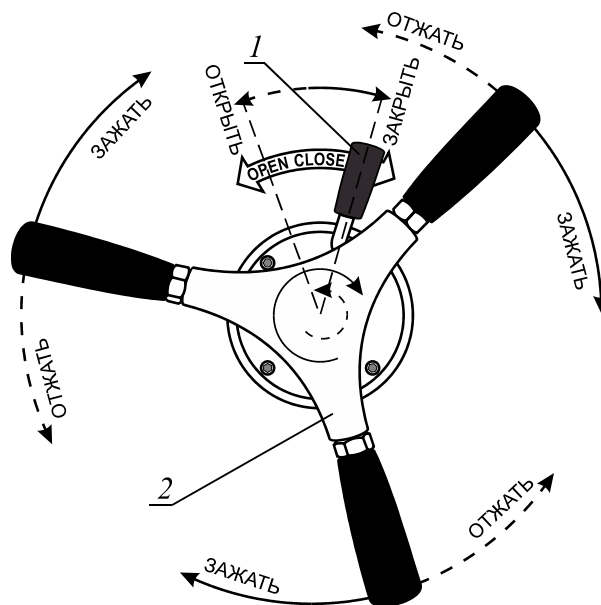


Рис. 11. Сдвоенная ручка дверей автоклава:  
1 – качающаяся часть; 2 – вращающаяся часть

2.3.7. После того как загорится контрольная лампа «HEAT» в группе индикаторов процесса 4, включают потенциометр и секундомер. Изменение температуры в контрольных образцах фиксируют с помощью самописца потенциометра или визуально. Во втором случае показания со шкалы потенциометра снимают каждые 5–10 мин. Значения температуры всех контрольных образцов записывают в табл. 16.

Таблица 16

**Изменение температуры внутренних слоев контрольных образцов**

| Номер замера | Время нагрева, мин | Температура образцов, °С |     |     |
|--------------|--------------------|--------------------------|-----|-----|
|              |                    | № 1                      | № 2 | № 3 |
| 1            | 0                  |                          |     |     |
| 2            | 10                 |                          |     |     |
| ...          | ...                |                          |     |     |

2.3.8. Опыт прекращают после достижения внутри всех образцов температуры, отличающейся от температуры обрабатываемой

среды не более чем на  $3^{\circ}\text{C}$ . Для этого необходимо остановить автоклав нажатием кнопки , затем дождаться звукового сигнала, свидетельствующего о безопасности открытия двери и опорожнения камеры. При этом экран температуры отобразит моргающий текст «END». Вращением ручки против часовой стрелки до упора и переводом качающейся части в сторону «OPEN» открывают дверь, извлекают образцы, предварительно освободив их от термопар. Прикрывают дверь автоклава и, не трогая вращающуюся часть ручки, переводят качающуюся часть в положение «CLOSE». В этом состоянии камера будет вентилироваться в комнатных условиях, что необходимо по требованию санитарных норм. Далее качающуюся клавишу (кнопку) включения/выключения автоклава 10 переводят в положение «0», предохранительный выключатель – в положение «OFF» и отсоединяют вилку от розетки.

2.3.9. По данным табл. 16 строят графические зависимости изменения температуры внутренних слоев древесины во времени. По графикам определяют продолжительность прогрева каждого контрольного образца. Результаты заносят в табл. 17.

Таблица 17

**Продолжительность начального прогрева**

| Способ определения продолжительности прогрева | Контрольные образцы |     |     |
|-----------------------------------------------|---------------------|-----|-----|
|                                               | № 1                 | № 2 | № 3 |
| Экспериментально                              |                     |     |     |
| Табличный метод                               |                     |     |     |
| Аналитический метод                           |                     |     |     |

2.3.10. Контрольные образцы взвешивают на технических весах с точностью до 1 г. По формуле (4) рассчитывают влажность древесины после начального прогрева. Результаты взвешиваний и расчета заносят в табл. 15.

#### **2.4. Расчет продолжительности начального прогрева табличным методом.**

2.4.1. Пользуясь таблицами приложения 8, определяют значения  $\tau_{\text{исх}}$ , коэффициентов  $A_T$  и  $A_B$ .

2.4.2. С учетом рекомендаций, изложенных в разделе 1 данной лабораторной работы, принимают значения коэффициентов  $A_{\text{п}}$  и  $A_{\text{ш}}$ .

2.4.3. По формуле (47) рассчитывают продолжительность начального прогрева.

2.4.4. Действия по п. 2.4.1–2.4.3 повторяют для каждого контрольного образца. Результаты расчетов заносят в табл. 17.

### **2.5. Расчет продолжительности начального прогрева аналитическим методом.**

2.5.1. Определяют расчетную температуру древесины по формуле

$$t_p = \frac{t_c + t_x + 2 \cdot t_0}{4}, \quad (49)$$

где  $t_c$  – температура среды, °C;  $t_x$  – температура, до которой прогреваются средние слои сортиментов, °C;  $t_0$  – начальная температура древесины, °C.

2.5.2. По диаграммам приложений 2, 4, 5 находят плотность, удельную теплоемкость древесины контрольных образцов, а также номинальное значение коэффициента теплопроводности древесины березы поперек волокон. По формуле (12) рассчитывают коэффициент теплопроводности древесины контрольных образцов.

2.5.3. Рассчитывают коэффициент температуропроводности древесины контрольных образцов по формуле (13).

2.5.4. Используя формулу (36), определяют безразмерную температуру  $\Theta$ . По номограмме приложения 7 находят значение критерия Фурье.

2.5.5. По формуле (47) рассчитывают время нагрева древесины на оси контрольных образцов до заданной температуры. В случае если у какого-то образца отношение  $S/B \geq 0,3$ , время прогрева уточняют с помощью формулы (48). Результаты расчетов заносят в табл. 17.

2.5.6. Анализируют данные табл. 17. Сравнивают значения продолжительности прогрева, полученные экспериментально и расчетным путем. Отмечают влияние на скорость прогрева толщины сортиментов и породы древесины.

2.5.7. Анализируют данные табл. 15. Отмечают изменение или сохранение влажности контрольных образцов.

## **3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Для чего проводится начальный прогрев древесины перед сушкой?

2. Какое условие надо выполнить при проведении начального прогрева?

3. Какими должны быть температура и психрометрическая разность при начальном прогреве древесины?

4. Как долго следует прогревать древесину перед сушкой? Что является критерием завершения этого процесса?

5. Какие существуют методы определения продолжительности начального прогрева?

6. Как определить продолжительность прогрева табличным методом?

7. Как определить продолжительность начального прогрева аналитическим методом?

8. Каким образом учитываются размеры поперечного сечения сортиментов при определении времени прогрева?

## **ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ**

*Цель работы:* изучение механизма сушки древесины, определение продолжительности низкотемпературного процесса сушки древесины.

### **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

#### **1.1. Закономерности перемещения влаги в древесине.**

Сушка древесины становится возможной благодаря тому, что влага, находящаяся в древесине, перемещается из внутренней зоны к поверхности, откуда и происходит ее испарение в окружающую среду. Движение влаги внутри древесины может происходить под действием градиента влажности (влагодержания), градиента температуры и градиента избыточного давления.

Перемещение влаги под действием градиента влажности называется *влажностью*. Этот процесс описывается уравнением

$$i = -a' \cdot \rho_0 \cdot \frac{du}{dx}, \quad (50)$$

где  $i$  – плотность потока влаги,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $a'$  – коэффициент влагопроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_0$  – плотность древесины в абсолютно сухом состоянии,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $u$  – влагодержание,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $x$  – координата, в направлении которой перемещается влага,  $\text{м}$ ;  $du / dx$  – градиент влагодержания.

Коэффициент влагопроводности  $a'$  – очень важный показатель, определяющий скорость сушки древесины. Он устанавливается опытным путем и зависит от температуры, породы древесины, местоположения образца в стволе и направления движения влаги относительно волокон.

Наиболее существенно на коэффициент влагопроводности влияет температура: с ростом этого параметра коэффициент влагопроводности заметно возрастает. Объясняется такая закономерность

увеличением коэффициента диффузии водяного пара и снижением вязкости жидкой влаги в капиллярах.

Влияние породы древесины на коэффициент влагопроводности объясняется особенностями анатомического строения и различием плотности разных пород древесины. С повышением плотности интенсивность влагопереноса снижается из-за уменьшения носительного объема капилляров.

Местоположение образца в стволе имеет значение для древесины ядровых и спелодревесных пород. Коэффициент влагопроводности ядра и спелой древесины ниже, чем заболони, что объясняется закупоркой пор тиллами и смолами.

Древесина имеет анизотропное строение. Поэтому ее влагопроводность в различных структурных направлениях неодинакова. Наибольшее значение коэффициента влагопроводности – в направлении вдоль волокон. В направлении поперек волокон он значительно меньше, причем радиальная влагопроводность несколько превышает тангенциальную: для сосны и ели – в 1,1, березы – 1,2, дуба и бука – 1,5 раза. Величина коэффициента влагопроводности в тангенциальном направлении может быть определена по диаграмме приложения 10 в зависимости от температуры и базисной плотности древесины.

Способность древесины перемещать влагу под действием градиента температуры называется *термовлагопроводностью*. Явление термовлагопроводности описывается уравнением

$$i = -a' \cdot \rho_0 \cdot \delta \cdot \frac{dt}{dx}, \quad (51)$$

где  $\delta$  – термоградиентный коэффициент.

Термоградиентный коэффициент численно равен отношению

$$\delta = \frac{du}{dt} \quad (52)$$

и зависит, прежде всего, от влажности древесины. В случае если древесина сырая, т. е. ее влажность превышает предел насыщения клеточных стенок, то термоградиентный коэффициент зависит также и от температуры.

Влага внутри древесины может перемещаться в виде пара под действием градиента давления. Такое явление получило название *молярный влагоперенос* и описывается уравнением

$$i = -b \cdot \frac{dp}{dx}, \quad (53)$$

где  $b$  – коэффициент молярного переноса.

Знак «–» в уравнениях (50), (51) и (53) говорит о том, что движение влаги происходит в направлении от больших значений влажности, температуры и давления к меньшим.

В общем случае, когда действуют все три движущие силы влагопереноса, их эффект суммируется, и обобщенное уравнение влагопереноса выглядит следующим образом:

$$i = -a' \cdot \rho_0 \cdot \left( \frac{du}{dx} + \delta \cdot \frac{dt}{dx} \right) - b \cdot \frac{dp}{dx}. \quad (54)$$

## 1.2. Механизм сушки древесины.

Существует много различных видов и способов сушки древесины. Поэтому не может быть единого механизма сушки, пригодного для всех случаев.

В деревообрабатывающей промышленности наибольшее применение нашла конвективная газопаровая сушка. Особенности протекания такой сушки зависят от начальной влажности материала и температуры сушильного агента. С учетом величины этих параметров различают следующие варианты конвективной сушки:

а) по уровню влажности она может быть с начальной влажностью ниже и выше предела насыщения клеточных стенок;

б) по уровню температуры среды сушка может быть низкотемпературной ( $t_c < 100^\circ\text{C}$ ) и высокотемпературной ( $t_c > 100^\circ\text{C}$ ).

В данной лабораторной работе изучается низкотемпературная сушка. Рассмотрим ее особенности для случая, когда начальная влажность древесины меньше предела насыщения клеточных стенок. Графические зависимости изменения температуры материала и его влажности во время сушки показаны на рис. 12.

Температура поверхности сортамента (кривая 1) повышается на протяжении всего периода сушки. При этом вначале она возрастает быстро (период  $OA$ ), а затем медленно (период  $AB$ ), постепенно приближаясь к температуре обрабатывающей среды  $t_c$ . Температура центральной зоны сортамента (кривая 2) также возрастает, но в период  $OA$  значительно медленнее по сравнению с температурой поверхности. В это время разность указанных температур достигает максимальной величины. В дальнейшем (период  $AB$ )

скорость роста температуры центральной зоны возрастает, и постепенно температурное поле по толщине сортимента выравнивается. Промежуток времени  $0A$  называется периодом прогрева,  $AB$  – периодом сушки.

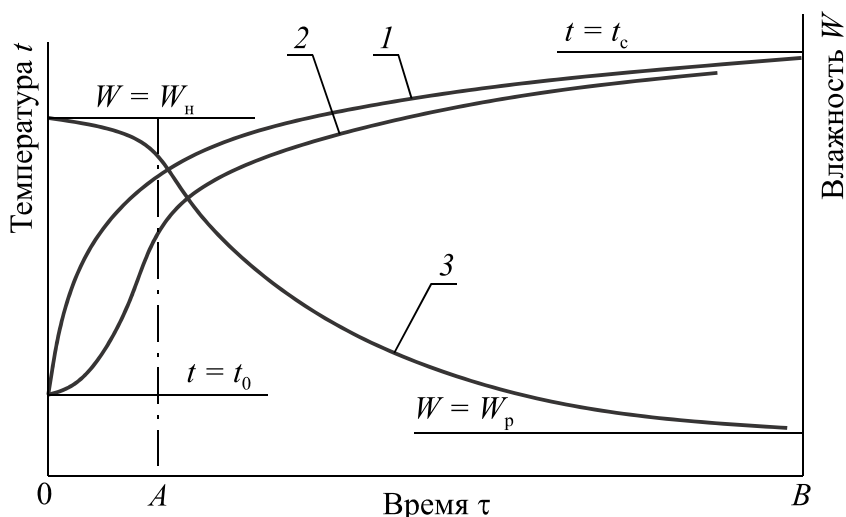


Рис. 12. Изменение температуры и влажности древесины при сушке ( $W_n < W_{\text{пн}}$ ):  
 1 – температура поверхности;  
 2 – температура центральной зоны;  
 3 – средняя влажность

Изменение средней влажности сортимента во времени иллюстрирует кривая 3. В начальный период  $0A$  она изменяется очень мало, сохраняя величину, близкую к  $W_n$ . После завершения периода прогрева влажность древесины уменьшается. Причем вначале это происходит быстро, а с течением времени все медленнее. Кривая изменения влажности во времени асимптотически приближается к значению  $W_p$ .

Описанный ход кривых 1–3 может быть объяснен следующим образом. В первые минуты контакта древесины с обрабатывающей средой происходит интенсивное испарение влаги с ее поверхности. Внутри сортимента возникает градиент влажности, направленный изнутри древесины к поверхности, который должен инициировать перемещение влаги в этом же направлении за счет влаготеплопроводности. Однако в это же время температура древесины на поверхности намного превышает температуру внутри. Противоположно направленный градиент температуры противодействует

градиенту влажности и препятствует продвижению влаги к поверхности. Именно поэтому в период прогрева влажность древесины изменяется несущественно.

После завершения прогрева значения температуры сортимен-та на поверхности и внутри становятся близкими. Градиент температуры уменьшается и не препятствует больше движению влаги к поверхности под действием градиента влажности. Наступает период сушки, сопровождающийся уменьшением средней влажности древесины. Влага за счет влагопроводности поступает из центральной зоны к поверхности, откуда испаряется в окружающую среду. По мере снижения средней влажности древесины градиент влажности внутри сортимен-та также уменьшается. Следствием этого является постепенное замедление сушки. Полностью она прекращается после достижения древесиной равновесной влажности для данного состояния обрабатывающей среды.

Несколько по-другому проходит сушка древесины, начальная влажность которой больше предела насыщения клеточных стенок. Изменение температуры и влажности материала для этого случая показано на рис. 13.

В начальный период времени  $OA$  температура поверхности сортимен-та быстро возрастает, достигая значения температуры смоченного термометра  $t_m$ . Температура центральной зоны внача-ле отстает от температуры поверхности, но в конце периода  $OA$  они сравниваются. Далее следует период  $AB$ , в течение которого температура по всей толщине сортимен-та стабилизируется на уровне температуры мокрого термометра. После завершения этого периода температура древесины вновь начинает возрастать, при-чем у поверхности она все время немного выше, чем в середине сортимен-та (период  $BC$ ).

Средняя влажность древесины (кривая 3) в период прогрева почти не изменяется. После его завершения влажность начинает уменьшаться. Пока температура сортимен-та удерживается на по-стоянном уровне, снижение влажности происходит с постоянной скоростью, т. е. зависимость  $W=f(\tau)$  имеет на этом этапе линей-ный характер. Именно поэтому период  $AB$  называется периодом постоянной скорости сушки. Когда температура древесины вновь начинает повышаться (период  $BC$ ), скорость сушки замедляется, а влажность изменяется во времени по криволинейному закону. Это так называемый период падающей скорости сушки.

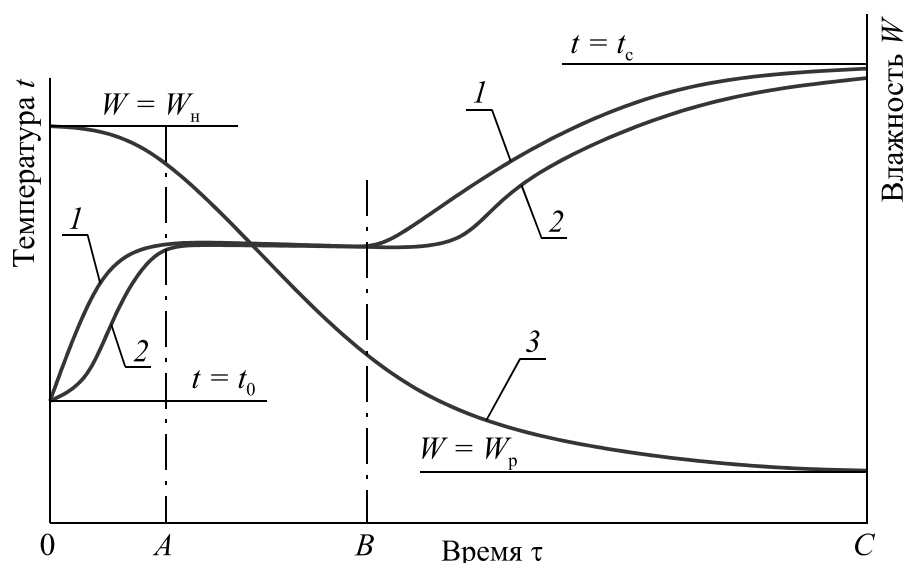


Рис. 13. Изменение температуры и влажности древесины при сушке ( $W_H > W_{\text{пн}}$ ):  
 1 – температура поверхности;  
 2 – температура центральной зоны;  
 3 – средняя влажность

Механизм сушки для описываемого случая может быть представлен следующим образом. При контакте древесины с обрабатывающим агентом из поверхностных слоев испаряется свободная влага. В результате между внутренними и наружными слоями сортимента возникает разность капиллярных давлений, которая инициирует подсос к поверхности свободной влаги по мере ее испарения. Первоначально количество подсасываемой влаги соответствует количеству испаряемой, и потому влажность наружных слоев поддерживается на постоянном уровне, близком к пределу насыщения клеточных стенок ( $W_{\text{пн}}$ ). Скорость сушки при этом постоянна и определяется интенсивностью испарения влаги с поверхности древесины (период  $AB$ ).

По мере увеличения пути, который должна проделать свободная влага, достигая поверхности, скорость подсоса уменьшается, и наступает момент, когда она становится меньше скорости испарения с поверхности. После этого в древесине образуются две зоны: наружная с влажностью ниже  $W_{\text{пн}}$  и внутренняя с влажностью выше этого предела. В наружной зоне действует градиент влажности и влага перемещается за счет влагопроводности, во внутренней действуют силы капиллярного давления и происходит подсос

свободной влаги. В этот момент времени температура поверхностных слоев сортамента начинает повышаться, а в середине еще удерживается на уровне  $t = t_m$ . После того как влажность во внутренних слоях древесины достигает предела насыщения клеточных стенок, их температура также начинает возрастать. За счет имеющегося градиента влажности влага перемещается по направлению к поверхности за счет влагопроводности. Процесс сушки далее протекает по уже рассмотренному нами механизму.

### 1.3. Расчет продолжительности сушки.

Продолжительность сушки единичного сортамента (неограниченной пластины) может быть определена с использованием формул

$$\tau = \frac{S^2}{\pi^2 \cdot a'} \cdot \left( 1 + \frac{\pi^2}{4 \cdot Bi} \right) \cdot \ln \left( \frac{B}{\Theta'} \right); \quad (55)$$

$$Bi = \frac{\alpha' \cdot S}{2 \cdot a'}; \quad (56)$$

$$\Theta' = \frac{W_k - W_p}{W_n - W_p}, \quad (57)$$

где  $S$  – толщина сортамента, см;  $a'$  – коэффициент влагопроводности,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $Bi$  – критерий Био;  $B$  – безразмерный параметр;  $\Theta'$  – безразмерная влажность;  $\alpha'$  – коэффициент влагообмена,  $\text{см}/\text{с}$ ;  $W_n$  и  $W_k$  – начальная и конечная влажность древесины, %;  $W_p$  – равновесная влажность древесины, %.

При выполнении расчетов следует учитывать, что коэффициент влагопроводности зависит от структурного направления древесины. Справочные материалы (приложение 10) позволяют определить значение данного коэффициента в тангенциальном направлении. Для радиального направления коэффициент влагопроводности уточняют с помощью формулы

$$a'_{\text{рад}} = a'_{\text{танг}} \cdot k, \quad (58)$$

где  $a'_{\text{рад}}$  и  $a'_{\text{танг}}$  – коэффициенты влагопроводности древесины в радиальном и тангенциальном направлениях,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $k$  – переводной коэффициент, равный для сосны и ели 1,1, березы – 1,2, бука и дуба – 1,5.

## **2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

---

### **2.1. Материалы, приборы, инструменты:**

- образцы древесины различной толщины размером 100×100 мм с начальной влажностью 60–70%;
- фильтровальная бумага;
- сушильный шкаф;
- весы аналитические (точность определения массы – 0,01 г);
- эксикатор;
- секундомер.

### **2.2. Определение зависимости влажности древесины от продолжительности сушки.**

2.2.1. Устанавливают температуру в сушильном шкафу, заданную преподавателем.

2.2.2. Из емкости с водой извлекают контрольный образец. С помощью фильтровальной бумаги с его поверхности удаляют избыток влаги.

2.2.3. Образец взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,01 г. Полученное значение начальной массы образца  $M_n$  заносят в первую строку табл. 18 в графу  $m_i$ .

2.2.4. Открывают дверку сушильного шкафа. Образец кладут на перфорированную полку. Дверку закрывают.

2.2.5. В процессе сушки каждые 10 мин образец извлекают из шкафа, взвешивают на аналитических весах, фиксируя таким образом относительную массу образца  $m_i$ , и вновь помещают в шкаф. Полученные значения текущей массы образца  $m_i$  заносят в табл. 18. Эту процедуру проделывают до тех пор, пока два последних взвешивания образца не дадут одинаковый результат. Частота выполнения замеров может быть скорректирована по указанию преподавателя.

2.2.6. Высушенный образец (достигший неизменяемой массы во время сушки) извлекают из сушильного шкафа, охлаждают в эксикаторе и взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,01 г. Значение массы высушенного образца  $M_0$  записывают в последнюю строку табл. 18 в графу  $m_i$ .

2.2.7. По формуле (1) рассчитывают начальную влажность древесины и записывают это значение в первую строку табл. 18 в графу  $W_i$ .

Таблица 18

**Изменение массы и влажности образца в процессе сушки**

| Время с начала опыта<br>$\tau$ , мин | Текущая масса образца<br>$m_i$ , г | Текущая влажность<br>древесины $W_i$ , % |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|
| 0                                    |                                    |                                          |
| 10                                   |                                    |                                          |
| 20                                   |                                    |                                          |
| ...                                  |                                    |                                          |

2.2.8. Для каждого времени сушки рассчитывают текущую влажность образца по формуле (59). Результаты расчетов заносят в табл. 18.

$$W_i = \frac{m_i - M_0}{M_0} \cdot 100\%, \quad (59)$$

2.2.9. По полученным данным строят графическую зависимость влажности образца от времени сушки.

2.2.10. Используя построенный график, определяют продолжительность сушки до трех значений влажности, указанных преподавателем. Результаты определения заносят в табл. 19.

Таблица 19

**Продолжительность сушки образца**

| Влажность, % | Продолжительность сушки, мин |           |
|--------------|------------------------------|-----------|
|              | экспериментальная            | расчетная |
|              |                              |           |
|              |                              |           |
|              |                              |           |

**2.3. Расчет продолжительности сушки образца до заданных значений влажности.**

2.3.1. По диаграмме приложения 10 определяют коэффициент влагопроводности древесины  $a'$  в тангенциальном направлении в зависимости от базисной плотности и температуры древесины.

2.3.2. При необходимости уточняют значение коэффициента по формуле (58).

2.3.3. Коэффициент влагообмена  $\alpha'$  в зависимости от степени насыщенности, скорости и температуры сушильного агента находят

по диаграмме приложения 11. Значения необходимых параметров агента сушки уточняют у преподавателя.

2.3.4. Пользуясь формулой (56), рассчитывают критерий  $W_i$ . Для трех установленных преподавателем значений конечной влажности  $W_k$  по формуле (57) определяют безразмерную влажность древесины  $\Theta'$ . Необходимое для этого значение равновесной влажности находят по диаграмме приложения 2.

2.3.5. По таблице приложения 12 определяют безразмерный параметр  $B$ .

2.3.6. Рассчитывают продолжительность сушки контрольного образца древесины до заданных значений влажности по формуле (55). Результаты расчетов заносят в табл. 19.

#### **2.4. Анализ полученных результатов.**

2.4.1. На графической зависимости влажности древесины от времени сушки выделяют периоды прогрева, постоянной скорости сушки, уменьшающейся скорости сушки. Определяют координаты критических точек, в которых происходит переход от одного периода к другому.

2.4.2. Сопоставляют результаты расчета и экспериментально-го определения продолжительности сушки до заданных значений влажности. Анализируют причины их возможного несовпадения.

### **3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Что может быть движущей силой для перемещения влаги в древесине?

2. Что такое процесс влагопроводности? Каким уравнением он описывается?

3. От чего зависит коэффициент влагопроводности? В каких единицах он измеряется?

4. В чем заключается явление термовлагопроводности? Какое уравнение описывает этот процесс?

5. Что такое молярный влагоперенос? От чего зависит его интенсивность?

6. Как изменяются температура и влажность древесины в процессе конвективной низкотемпературной сушки при начальной влажности меньше предела насыщения клеточных стенок?

7. Как изменяются температура и влажность древесины в процессе сушки при начальной влажности больше предела насыщения клеточных стенок?

8. Каков механизм процесса сушки при условиях  $t_c < 100^\circ\text{C}$ ,  $W_n < W_{\text{пн}}$ ?

9. Каков механизм процесса сушки при условиях  $t_c < 100^\circ\text{C}$ ,  $W_n > W_{\text{пн}}$ ?

10. Как рассчитать продолжительность сушки древесины графоаналитическим способом?

11. Как определить коэффициенты влагопроводности и влагообмена, безразмерную влажность? От чего зависят их значения?

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ**

*Цель работы:* приобретение навыков оценки качества сушки древесины.

## **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

---

Важнейшая задача, решаемая при сушке древесины – обеспечение стабильности размеров и формы изготавливаемых из нее изделий. Уровень требований к качеству высушенной древесины зависит от ее последующего использования. Согласно актуальным Руководящим техническим материалам по технологии камерной сушки пиломатериалов (РТМ), различают четыре категории качества сушки:

- первая (I) категория – сушка пиломатериалов проводится до эксплуатационной влажности и обеспечивает особо точную механическую обработку и сборку деталей и узлов наиболее квалифицированных изделий (музыкальные инструменты, спортивный инвентарь, точные приборы и т. п.);

- вторая (II) категория – сушка пиломатериалов проводится до эксплуатационной влажности и обеспечивает точную механическую обработку деталей и узлов квалифицированных изделий (мебель, столярно-строительные изделия и т. п.);

- третья (III) категория – сушка пиломатериалов проводится до эксплуатационной влажности с последующим использованием их для изготовления менее квалифицированных изделий деревообработки (тара, строительный погонаж, товарные вагоны и т. п.);

- нулевая (0) категория – сушка товарных пиломатериалов до транспортной влажности.

Качество сушки характеризуется наличием дефектов и несколькими количественными показателями.

К *видимым дефектам* сушки пиломатериалов относятся расщеливание и коробление. Встречаются следующие виды трещин:

наружные, внутренние, торцовые и радиальные. *Наружные трещины* образуются в начальный период сушки. Причиной их появления является слишком жесткий режим, который приводит к возникновению чрезмерно больших растягивающих напряжений в поверхностных слоях сортимента. В отличие от наружных *внутренние трещины* образуются в конце сушки, когда растягивающие напряжения возникают в центре сортимента и их величина превышает предел прочности древесины. Для предупреждения возникновения наружных и внутренних трещин необходимо правильно выбирать и соблюдать режим сушки. Дополнительный способ борьбы с внутренними трещинами – промежуточная влаготеплообработка. *Торцовые трещины* появляются в результате более быстрой сушки торцов сортимента по сравнению с серединой. Способами борьбы с этим дефектом сушки являются покрытие торцов пиломатериалов влагонепроницаемым составом, применение торцезащитных экранов, а также соответствующая конструкция ограждений сушильной камеры, которая предохраняет торцы штабелей от интенсивного омыwania сушильным агентом. *Радиальные трещины* возникают при сушке пиломатериалов, содержащих сердцевинную трубку (брусья, круглые лесоматериалы). Причина радиальных трещин – анизотропия древесины. Ее усушка в тангенциальном направлении больше, чем в радиальном. В результате этого в периферийной зоне сортиментов появляются чрезмерные растягивающие напряжения даже при очень медленной и осторожной сушке. Предотвратить радиальные трещины при конвективной сушке невозможно. Единственный способ борьбы с ними – вырезать сердцевину или следить при раскросе пиломатериалов, чтобы сердцевинная трубка оказывалась на поверхности сортиментов. *Коробление* пиломатериалов также является следствием различной усушки в тангенциальном и радиальном направлениях. Для предупреждения коробления необходимо во время сушки фиксировать плоскую форму сортиментов. Достигается это строгим соблюдением всех правил укладки пиломатериалов в штабель.

Количественными показателями, характеризующими качество сушки, являются средняя величина конечной влажности, равномерность конечной влажности по объему штабеля, перепад влажности по толщине пиломатериалов, наличие и величина остаточных внутренних напряжений. Нормы требований к показателям качества для различных категорий приведены в табл. 20.

Таблица 20

**Нормы требований к показателям качества сушки**

| Показатель                                                                                                     | Категории качества |            |                   |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------|-------------------|-------------------|
|                                                                                                                | I                  | II         | III               | 0                 |
| Средняя конечная влажность, %                                                                                  | 7–10               | 7–15       | 10–15             | 16–20             |
| Отклонение конечной влажности отдельных досок (заготовок) от средней влажности штабеля, %, при их толщине, мм: |                    |            |                   |                   |
| – $S < 32$                                                                                                     | $<(\pm 2)$         | $<(\pm 3)$ | $<(\pm 4)$        | $<(\pm 6)$        |
| – $32 < S < 50$                                                                                                | $<(\pm 2)$         | $<(\pm 3)$ | $<(\pm 4)$        | $<(\pm 4)$        |
| – $S > 50$                                                                                                     | $<(\pm 2)$         | $<(\pm 3)$ | $<(\pm 4)$        | $<(\pm 2,5)$      |
| Перепад влажности по толщине пиломатериалов, %, при их толщине, мм:                                            |                    |            |                   | Не контролируется |
| – $S < 22$                                                                                                     | $<1,5$             | $<2,0$     | $<2,5$            |                   |
| – $22 < S < 40$                                                                                                | $<2,0$             | $<3,0$     | $<3,5$            |                   |
| – $40 < S < 60$                                                                                                | $<2,5$             | $<3,5$     | $<4,0$            |                   |
| – $S > 60$                                                                                                     | $<3,0$             | $<4,0$     | $<5,0$            |                   |
| Условный показатель остаточных напряжений, %                                                                   | $<1,5$             | $<2,0$     | Не контролируется |                   |

Для определения *средней конечной влажности* и *отклонения* от нее влажности отдельных досок из штабеля отбирают не менее 9 контрольных досок и от каждой из них отпиливают по две секции влажности. Влажность каждой секции определяют в соответствии с указаниями, приведенными в лабораторной работе № 1. Показатель отклонения от средней влажности вычисляют по формуле

$$\Delta W = 2 \cdot \sigma = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (W_i - W_{\text{ср}})^2}, \quad (60)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение влажности;  $n$  – количество испытываемых секций влажности, шт.;  $W_i$  – влажность отдельных секций, %;  $W_{\text{ср}}$  – средняя влажность древесины, %.

Для определения *перепада влажности по толщине* от нескольких контрольных досок (не менее пяти для первой и не менее трех для других категорий качества) рядом с секциями влажности вырезают секции послойной влажности, которые раскалывают на слои в соответствии с рис. 14.

Весовым способом определяют влажность образцов, помеченных на рис. 14 буквами «п» и «ц», после чего рассчитывают

показатель перепада влажности по толщине, пользуясь следующими формулами:

$$\delta W_i = W_{\text{ц}} - W_{\text{п}}; \quad (61)$$

$$\delta W = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \delta W_i, \quad (62)$$

где  $\delta W$  – среднее значение перепада влажности по толщине, %;  $\delta W_i$  – перепад влажности по толщине отдельного образца, %;  $W_{\text{ц}}$  – влажность центрального слоя секции, %;  $W_{\text{п}}$  – влажность поверхностного слоя секции, %;  $n$  – количество образцов, полученных из поверхностных слоев секций, шт.

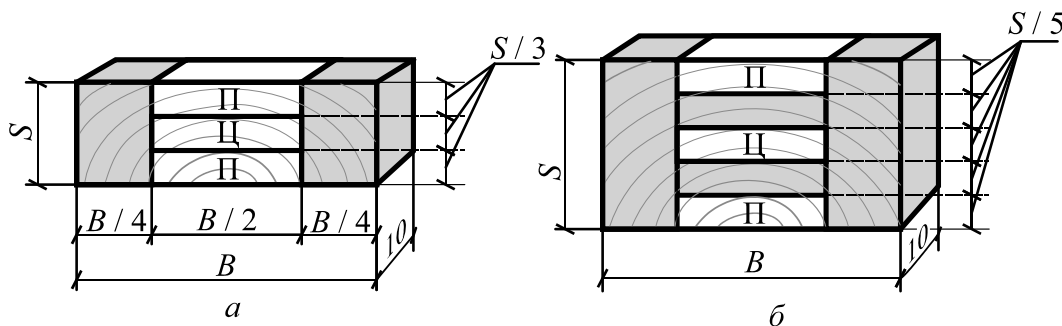


Рис. 15. Схема раскалывания секций послойной влажности древесины:  
 а – толщина пиломатериалов  $S \leq 32$  мм; б – толщина пиломатериалов  $S > 32$  мм;  
 В – ширина пиломатериалов

Условный показатель *остаточных внутренних напряжений* определяют по силовым секциям, которые выпиливают из тех же контрольных досок и в том же количестве, как и для контроля перепада влажности по толщине. Полученные силовые секции выдерживают в течение 2–3 ч в сушильном шкафу, после чего из них изготавливают двузубые гребенки, как это показано на рис. 15. Условный показатель остаточных внутренних напряжений рассчитывают как среднюю по всем секциям относительную деформацию зубцов  $f$ , определяемую по формуле

$$f = \frac{S - S_1}{2 \cdot l} \cdot 100\%, \quad (63)$$

где  $S$ ,  $S_1$  и  $l$  – размеры секции, измеренные в соответствии с рис. 15.

С помощью силовых секций наряду с остаточными внутренними напряжениями можно оценить суммарную величину

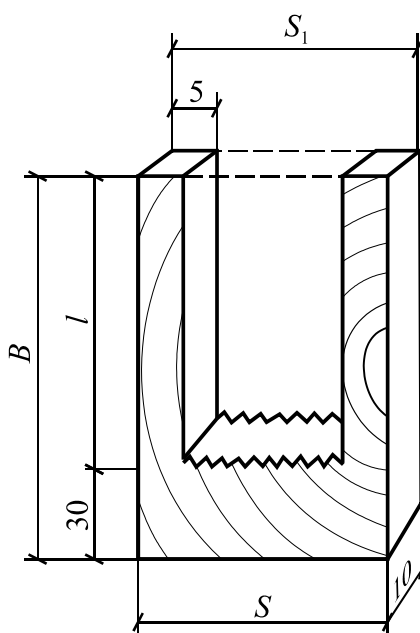


Рис. 15. Схема раскроя силовой секции:

$B$  – ширина сортифта;  
 $S$  – толщина сортифта;  
 $S_1$  – расстояние между  
 внешними гранями зубцов

внутренних напряжений (деформационных и влажностных) в момент выпиливания секций, а также характер распределения влажности по толщине материала. Для этого надо сравнить форму двузубых гребенок сразу после выпиливания силовых секций и после 2–3-часовой выдержки в сушильном шкафу.

Форма гребенок, полученных из силовых секций, не подвергавшихся выдержке в шкафу, дает представление о суммарной величине внутренних напряжений, имеющих в древесине в момент выпиливания секций. Гребенки могут принять одну из трех форм, показанных на рис. 16.

Если зубцы гребенки изгибаются наружу (рис. 16, а), значит, в материале имеются растягивающие напряжения в наружных слоях и сжимающие – во внутренних. Такая картина обычно наблюдается в начале сушки. Форма гребенки б (рис. 16) свидетельствует об обратном характере напряжений: сжатие поверхностных слоев и растяжение центральной зоны. Такой результат получается, если силовую секцию выпиливают в конце сушки. Зубцы гребенки остаются недеформированными, если внутренние напряжения в древесине отсутствуют или, что бывает чаще, влажностные и деформационные напряжения уравниваются друг друга.

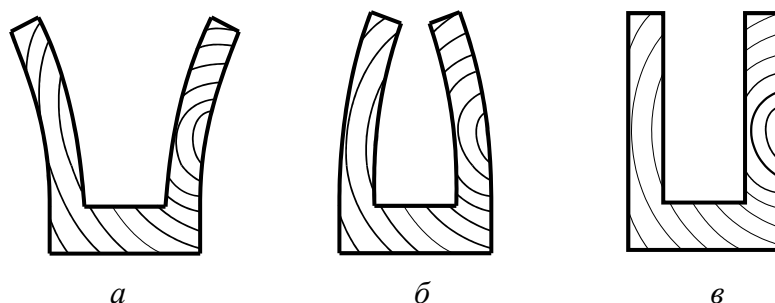


Рис. 16. Возможные формы двузубых гребенок, выпиленных из силовых секций

Анализ наличия в древесине остаточных (деформационных) внутренних напряжений проводят после выдержки силовых секций в комнатных условиях в течение 7–8 ч или 2–3 ч в сушильном шкафу при температуре 100–105°C. Имеется в виду, что после таких выдержек влажность древесины по объему становится равномерной. Если двузубая гребенка, выпиленная после выдержки секции, приобрела форму *б* (рис. 16), это значит, что в результате сушки древесина получила деформации удлинения на поверхности и укорочения внутри и соответственно имеет сжимающие остаточные напряжения в наружных слоях и растягивающие – во внутренних. Эта картина является достаточно обычной для конвективной сушки. Снять такие остаточные внутренние напряжения можно, применив конечную влаготеплообработку. Если после выдержки форма гребенки стала прямой (рис. 16, *в*), значит, остаточных деформаций в древесине нет вследствие правильно проведенной сушки. Форма гребенки *а* (рис. 16) говорит о том, что в материале имеются остаточные деформации укорочения на поверхности и удлинения – внутри. В процессе сушки таких деформаций не возникает, но они могут появиться после излишне интенсивной влаготеплообработки.

Для того чтобы составить представление о характере распределения влажности по толщине сортимента, надо сравнить форму гребенок до и после выдержки. Если она не изменилась, значит, влажность древесины в момент выпиливания силовых секций была равномерной по толщине. Если же в процессе выдержки произошла дополнительная деформация зубцов, влажность в контролируемом материале была распределена неравномерно. При этом дополнительный изгиб зубцов по сравнению с их первоначальным положением всегда происходит в сторону более влажных слоев.

## **2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

---

### **2.1. Материалы, приборы, инструменты:**

- доски, отобранные из одного штабеля после камерной сушки, с торцами, покрытыми масляной краской;
- масляная краска, кисть;
- сушильный шкаф, настроенный на температуру  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ ;

- аналитические весы (точность взвешивания – 0,01 и 0,001 г);
- штангенциркуль;
- ножовка;
- лобзик;
- стамеска и молоток;
- шлифовальная шкурка;
- линейка;
- карандаш.

## 2.2. Визуальный осмотр контрольных образцов.

Проводят оценку контрольных досок на наличие у них видимых дефектов: растрескивания и коробления. Результаты визуального осмотра заносят в табл. 24 (см. с. 81), отмечая наличие или отсутствие наружных, внутренних, торцовых и радиальных трещин, а также коробления.

## 2.3. Подготовка образцов.

2.3.1. Из контрольных досок в соответствии с рис. 17, а выпиливают секции влажности, послойной влажности и силовые секции.

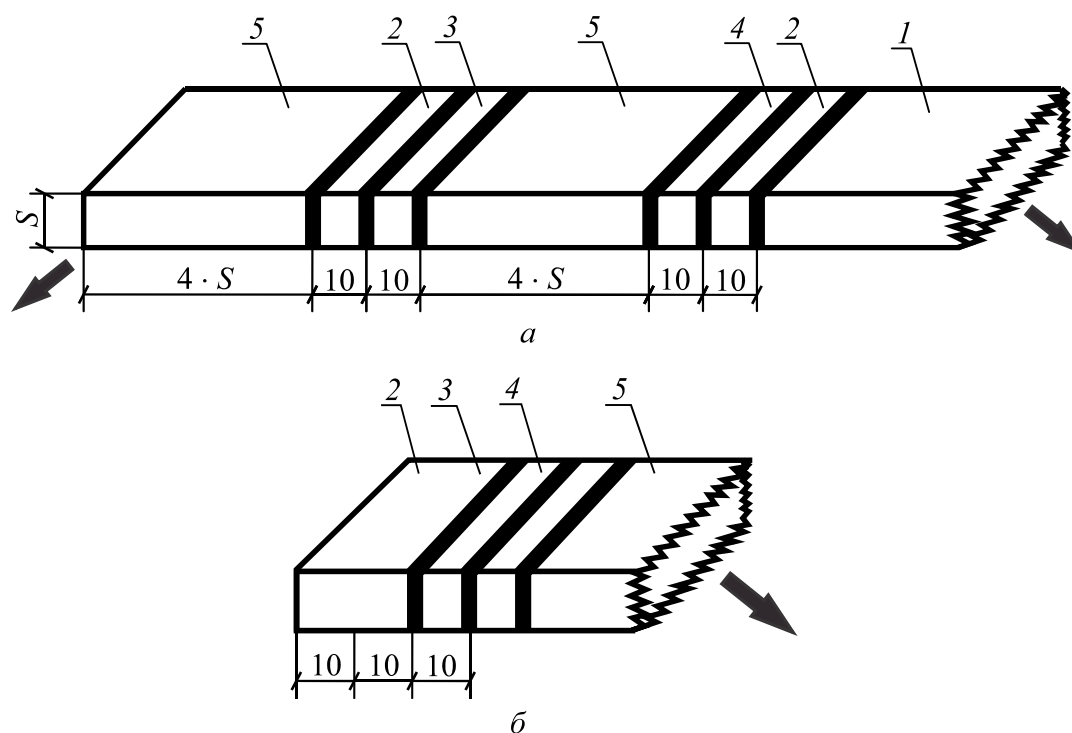


Рис. 17. Схема выпиливания секций из контрольных досок:

1 – контрольная доска; 2 – секции влажности (секция «А»);

3 – секция послойной влажности (секция «Б»);

4 – силовая секция (секция «В»); 5 – отрезки

2.3.2. Отрезки 5 отбрасывают. Образовавшийся свежий торец контрольной доски 1 покрывают слоем масляной краски.

2.3.3. Все секции обрабатывают шлифовальной шкуркой, удаляя с их поверхности заусеницы.

2.3.4. При использовании свежих (некондиционированных) образцов по решению преподавателя допускается использовать схему раскроя, указанную на рис. 17, б.

#### **2.4. Определение средней конечной влажности древесины и отклонения конечной влажности отдельных досок от средней влажности штабеля.**

2.4.1. Секции влажности, полученные из контрольных досок, маркируют карандашом буквой «А» и номерами начиная с 1. Например:  $A-\frac{1}{1}$ ,  $A-\frac{2}{1}$ ,  $A-\frac{1}{2}$ ,  $A-\frac{2}{2}$  и т. д., где число над знаком дроби соответствует номеру секции ( $n$ ) в одной конкретной доске, а под знаком – номеру доски ( $k$ ).

2.4.2. Определяют влажность каждой секции и среднюю влажность древесины в соответствии с п. 2.3 лабораторной работы № 1. Результаты взвешиваний и расчетов заносят в табл. 21.

2.4.3. Рассчитывают отклонение от средней влажности для отдельных секций  $W_i - W_{\text{ср}}$  и показатель отклонения от средней влажности для всего штабеля по формуле (60). Результаты выполненных расчетов также заносят в табл. 21.

Таблица 21

**Определение средней конечной влажности древесины  
и показателя отклонения от нее**

| Номер секции    | Масса секции, г |          | Влажность, % |         | Отклонение влажности, % |            |
|-----------------|-----------------|----------|--------------|---------|-------------------------|------------|
|                 | начальная       | конечная | секции       | средняя | $W_i - W_{\text{ср}}$   | $\Delta W$ |
| $A-\frac{1}{1}$ |                 |          |              |         |                         |            |
| ...             |                 |          |              |         |                         |            |
| $A-\frac{n}{1}$ |                 |          |              |         |                         |            |
| ...             |                 |          |              |         |                         |            |
| $A-\frac{1}{k}$ |                 |          |              |         |                         |            |
| ...             |                 |          |              |         |                         |            |
| $A-\frac{n}{k}$ |                 |          |              |         |                         |            |

## 2.5. Определение перепада влажности по толщине.

2.5.1. Секции послойной влажности раскалывают на образцы, руководствуясь схемой, представленной на рис. 17. В случае недостаточной ширины лезвия раскалывающего инструмента допускается выпиливание образцов при помощи только ручного инструмента.

2.5.2. Полученные в результате раскалывания образцы маркируют карандашом следующим образом: Б1-П<sub>1</sub>, Б1-П<sub>2</sub>, Б1-Ц и т. д., где 1 – номер исходной доски.

2.5.3. Определяют влажность каждого образца по методике, описанной в п. 2.3 лабораторной работы № 1. Результаты взвешиваний и расчетов записывают в табл. 22.

Таблица 22

Определение перепада влажности по толщине

| Номер секции | Маркировка образца | Масса образца, г |          | Влажность, % | Перепад влажности, %          |            |
|--------------|--------------------|------------------|----------|--------------|-------------------------------|------------|
|              |                    | начальная        | конечная |              | $W_{\text{ц}} - W_{\text{п}}$ | $\delta W$ |
| Б1           | Б1-П <sub>1</sub>  |                  |          |              |                               |            |
|              | Б1-П <sub>2</sub>  |                  |          |              |                               |            |
|              | Б1-Ц               |                  |          |              | —                             | —          |
| Б2           | Б1-П <sub>1</sub>  |                  |          |              |                               |            |
|              | Б1-П <sub>2</sub>  |                  |          |              |                               |            |
|              | Б1-Ц               |                  |          |              | —                             | —          |
| ...          | ...                |                  |          |              |                               |            |

2.5.4. По формулам (61) и (62) рассчитывают перепад влажности по толщине для отдельных секций  $W_{\text{ц}} - W_{\text{п}}$  и показатель перепада влажности по толщине  $\delta W$ . Результаты расчетов заносят в табл. 22.

## 2.6. Определение внутренних напряжений в древесине

2.6.1. Силовые секции, выпиленные из трех контрольных досок, маркируют буквой «В» и цифрой, соответствующей номеру исходной доски (например, В-1).

2.6.2. Из секций, руководствуясь схемой, представленной на рис. 15, изготавливают двузубые гребенки. При этом используют ножовку или лобзик, стамеску и молоток.

2.6.3. Штангенциркулем определяют размеры  $l$ ,  $S$  и  $S_1$  с точностью до 0,1 мм. Результаты измерений, а также разность  $S - S_1$  заносят в табл. 23.

Таблица 23

**Определение внутренних напряжений**

| Но-<br>мер<br>сек-<br>ции | Размеры гребенки<br>до выдержки, мм |     |       |           | Размеры гребенки<br>после выдержки, мм |     |       |           | Показатель<br>остаточных внутренних<br>напряжений, % |         |
|---------------------------|-------------------------------------|-----|-------|-----------|----------------------------------------|-----|-------|-----------|------------------------------------------------------|---------|
|                           | $l$                                 | $S$ | $S_1$ | $S - S_1$ | $l$                                    | $S$ | $S_1$ | $S - S_1$ | секций                                               | средний |
| В-1                       |                                     |     |       |           |                                        |     |       |           |                                                      |         |
| В-2                       |                                     |     |       |           |                                        |     |       |           |                                                      |         |
| ...                       |                                     |     |       |           |                                        |     |       |           |                                                      |         |

2.6.4. Обмеренные гребенки помещают в сушильный шкаф с температурой  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ , где их выдерживают в течение 2 ч. В рамках ограниченного времени, выделенного на выполнение лабораторной работы, продолжительность выдержки может быть сокращена до 15 мин (по решению преподавателя).

2.6.5. После выдержки гребенки извлекают из шкафа и производят их повторный обмер в соответствии с п. 2.6.3. Результаты повторных измерений также заносят в табл. 23.

2.6.6. Пользуясь формулой (63), рассчитывают показатель остаточных внутренних напряжений для каждой секции, а также среднюю его величину. Результаты расчетов заносят в табл. 23.

2.6.7. По результатам проведенного испытания делают заключение:

- о характере суммарных внутренних напряжений в древесине в момент выпиливания силовых секций;

- о характере остаточных (деформационных) внутренних напряжений в древесине;

- о характере распределения влаги в древесине, сопоставляя этот вывод с данными табл. 22.

**2.7. Анализ результатов проведенных испытаний.**

2.7.1. Определенные в лабораторной работе показатели качества сушки древесины обобщают в табл. 24.

2.7.2. Сопоставляют данные табл. 24 с требованиями к высушенной древесине, изложенными в разд. 1 данной лабораторной работы. Делают заключение о принадлежности испытываемой древесины к одной из категорий качества сушки.

Таблица 24

**Показатели качества сушки древесины**

| Показатель качества                                                              | Значение показателя |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1. Наличие видимых дефектов (да, нет):                                           |                     |
| – трещин:                                                                        |                     |
| наружных                                                                         |                     |
| внутренних                                                                       |                     |
| торцовых                                                                         |                     |
| радиальных                                                                       |                     |
| – покоробленности                                                                |                     |
| 2. Средняя конечная влажность, %                                                 |                     |
| 3. Отклонение конечной влажности отдельных досок от средней влажности штабеля, % |                     |
| 4. Перепад влажности по толщине пиломатериалов, %                                |                     |
| 5. Условный показатель остаточных напряжений, %                                  |                     |

**3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие различают категории качества сушки древесины? Для изготовления каких изделий используют древесину, высушенную по различным категориям качества?

2. Какие видимые дефекты могут появиться при сушке древесины? Каковы причины их возникновения?

3. Как можно предотвратить при сушке древесины появление наружных, внутренних, торцовых и радиальных трещин? Как следует бороться с короблением пиломатериалов?

4. Какие количественные показатели используют при оценке качества сушки древесины?

5. Что такое эксплуатационная и транспортная влажность?

6. Как определяют среднюю конечную влажность древесины в штабеле?

7. Как рассчитывают показатель отклонения конечной влажности отдельных досок от средней влажности штабеля?

8. Как определяют перепад влажности пиломатериалов по толщине?

9. Что такое силовая секция? Как из нее изготавливают двузубую гребенку?

10. Какую информацию можно получить при анализе формы двузубой гребенки, изготовленной из силовой секции, сразу после выпиливания последней; после выдержки секции в сушильном шкафу?

11. Какие выводы можно сделать, если сразу после выпиливания силовой секции зубцы гребенки изгибаются наружу; если такую форму гребенка приобрела после 8-часовой выдержки в помещении?

12. Какие действия надо предпринять технологу сушильного цеха, если зубцы гребенки, выпиленной из высушенной в сушильном шкафу секции, изгибаются внутрь. О чем говорит такая форма гребенки?

13. Двузубая гребенка, изготовленная сразу после выпиливания секции, имела недеформированные зубцы. В процессе выдержки в помещении они изогнулись внутрь. О чем это свидетельствует?

14. Как можно количественно оценить величину остаточных внутренних напряжений в древесине?

## **КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ**

*Цель работы:* изучение технологии камерной сушки древесины, определение параметров режима сушки древесины.

### **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Технологический процесс камерной сушки пиломатериалов включает ряд операций, которые выполняются в определенной последовательности. К ним относятся:

- 1) начальная влаготеплообработка (начальный прогрев);
- 2) собственно сушка по определенному режиму;
- 3) промежуточная влаготеплообработка;
- 4) конечная влаготеплообработка;
- 5) кондиционирование;
- 6) охлаждение.

Каждая из перечисленных операций преследует определенную цель и решает конкретные задачи.

*Начальный прогрев* материала проводится после загрузки его в камеру с целью быстрого и равномерного прогрева по всей толщине. Сушка древесины при этом недопустима. Реализуют операцию начального прогрева путем выдержки пиломатериалов в воздухе повышенной температуры и высокой степени насыщенности. Высокая температура обеспечивает быстрое нагревание древесины, а высокая влажность воздуха препятствует испарению из нее влаги.

Собственно *сушка* следует за начальным прогревом. Ее цель – снижение влажности древесины до требуемого значения. Для проведения сушки в камере устанавливают параметры сушильного агента, заданные режимом сушки. По мере уменьшения влажности материала параметры сушильного агента корректируют. Заканчивают сушку после достижения древесиной конечного значения влажности.

*Конечную влаготеплообработку* (КВТО) проводят для устранения в древесине остаточных внутренних напряжений. Для этого уже высушенные пиломатериалы выдерживают установленное время в среде с повышенной температурой и(или) влажностью. *Промежуточную влаготеплообработку* (ПВТО) выполняют при сушке пиломатериалов из древесины твердых пород и (или) крупных сечений в середине процесса. Цель этой обработки и методика проведения такие же, как и в случае КВТО.

*Кондиционирование* проводят для выравнивания влажности древесины по объему отдельных досок и штабеля в целом. Выполняют эту технологическую операцию путем поддержания в камере таких параметров среды, при которых недосушенный материал подсыхает, а пересушенный – увлажняется. Кондиционирование не является обязательной операцией и выполняется по мере необходимости.

*Охлаждение* – завершающая операция сушки, которая проводится перед выгрузкой материала из камеры для снижения его температуры до 30–40°C.

Условия для проведения рассмотренных выше операций технологического процесса камерной сушки выбирают в зависимости от вида, свойств и размеров пиломатериалов, а также от конечного результата, который надо получить в итоге сушки. При этом учитывают конструктивные особенности и технические характеристики камер, в которых реализуется процесс.

**Режимы камерной сушки пиломатериалов.** Режим сушки – это расписание состояния сушильного агента, вступающего в контакт с материалом, которое устанавливает изменение его параметров во времени или в зависимости от влажности древесины. В отечественной практике состояние сушильного агента принято характеризовать температурой, психрометрической разностью и степенью насыщенности. Эти параметры находятся в тесной взаимосвязи друг с другом, т. е. фиксированным значениям двух из них соответствует строго определенное значение третьего. В зарубежных сушильных камерах вместо психрометрической разности используют показатель равновесной влажности (*EMC – equilibrium moisture content*), к которой стремится древесина. Этот показатель измеряется при помощи целлюлозной бумажки, размещаемой между двумя электродами, работающими по кондуктометрическому принципу (лабораторная работа № 1). Благодаря введению этого

показателя стало возможным характеризовать интенсивность сушки не только по времени ее проведения, но и с помощью такого показателя, как градиент сушки ( $DG$  – *drying gradient*). Градиент сушки представляет собой отношение текущей влажности древесины к равновесной ( $W_t / W_p$ ). Чем больше этот показатель, тем быстрее проходит сушка.

Различают режимы низкотемпературного и высокотемпературного процессов сушки.

*Низкотемпературные режимы* предусматривают использование в качестве сушильного агента влажного воздуха или его смеси с топочным газом с температурой в начальной стадии сушки менее 100°C. При этом допускается использование более высокой температуры в конце процесса, когда древесина уже не содержит свободной воды.

*Высокотемпературные режимы* предусматривают использование в качестве сушильного агента перегретого пара атмосферного давления с температурой более 100°C на протяжении всего процесса сушки.

Высокотемпературные режимы обеспечивают бездефектную сушку при незначительном изменении прочности на изгиб, растяжение и сжатие, но при заметном (до 35%) снижении прочности на скалывание и потемнении древесины. Они могут быть применены для сушки до эксплуатационной влажности пиломатериалов с целевым назначением для изделий, работающих с большим запасом прочности. Не рекомендуется сушка этими режимами пиломатериалов для изделий, подвергаемых силовым нагрузкам.

Режимы низкотемпературной сушки в камерах периодического действия имеют *многоступенчатую структуру*, т. е. предусматривают ступенчатое изменение параметров сушильного агента в зависимости от влажности древесины (ГОСТ 19773–84). При этом температура и психрометрическая разность от ступени к ступени возрастают, а степень насыщенности и равновесная влажность уменьшаются. Влажность древесины, при которой осуществляют переход от одной ступени сушки к другой, называют *переходной влажностью*.

Режимы высокотемпературного процесса сушки в камерах периодического действия имеют *двухступенчатую структуру* с одной переходной влажностью – 20%. Эта особенность обусловлена относительно небольшой продолжительностью сушки.

Температура смоченного термометра для всех режимов устанавливается постоянной –  $t_m = 100^\circ\text{C}$ , что соответствует температуре водяного пара при атмосферном давлении. Допускается снижение температуры смоченного термометра до  $98^\circ\text{C}$ . Однако если это происходит, соответственно должна быть снижена температура сушильного агента с поддержанием заданного режимом значения психрометрической разности (или ЕМС).

Высокотемпературные режимы не рекомендуется применять при скорости циркуляции сушильного агента в камере менее 2,0 м/с.

*Режимы сушки в противоточных камерах непрерывного действия* принципиально отличаются от режимов сушки в камерах периодического действия. Состояние сушильного агента в них изменяется не ступенчато во времени, а непрерывно по длине камеры. При входе же воздуха в штабели в разгрузочном конце камеры и при выходе в загрузочном конце параметры, характеризующие его состояние, остаются постоянными во времени. С учетом этого режимы сушки в противоточных камерах задаются состоянием сушильного агента на входе в сушильное пространство и выходе из него. В разгрузочном конце камеры регламентируются три параметра: температура, психрометрическая разность (или ЕМС) и степень насыщенности. В загрузочном конце режимами устанавливается только один параметр – психрометрическая разность (или ЕМС).

Противоточные камеры непрерывного действия предназначены в основном для сушки древесины хвойных пород. В отдельных случаях, однако, они могут быть использованы и для сушки пиломатериалов лиственных рассеянно-сосудистых пород (березы, ольхи, липы). Наиболее целесообразно сушить в таких камерах пиломатериалы до транспортной влажности (18–22%). Допускается также сушка древесины мягких хвойных пород до эксплуатационной влажности (10–12%). Сушка до этой влажности лиственных пиломатериалов хотя и предусматривается стандартом, не дает хороших результатов и поэтому не рекомендуется.

## **2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

---

### **2.1. Материалы, приборы, инструменты:**

- образцы древесины различной толщины, влажности и породы;
- электровлагомер Gann Hydromette НТ;

- штангенциркуль;
- измеритель-регулятор KDM-E5;
- персональный компьютер;
- программное обеспечение KDM easy@full.control;
- ручной столярный инструмент (молоток, пассатижи).

## 2.2. Подготовка системы измерения к работе.

Автоматическая система измерения/регулирования работает по схеме, изображенной на рис. 18.

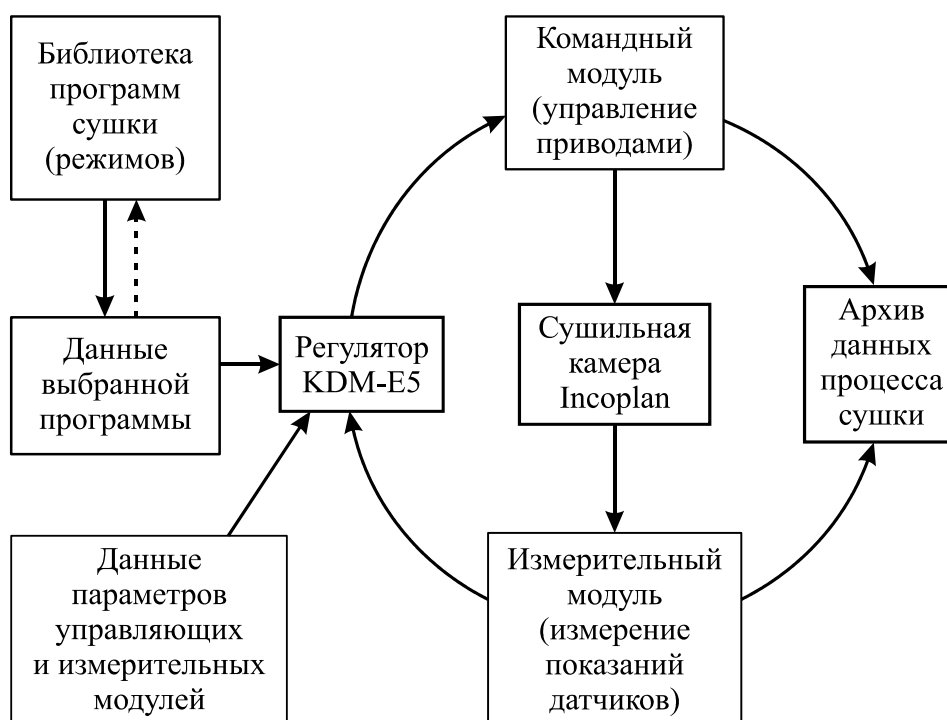


Рис. 18. Логическая схема работы регулятора KDM-E5

2.2.1. Подключают шкаф-регулятор 14 (рис. 19) и ПК 15 к электрической сети. Соединяют ПК с регулятором при помощи USB электронного ключа.

2.2.2. Получают от преподавателя доски или их фрагменты с различной влажностью. Путем усреднения значений замеров толщины досок штангенциркулем по 6 точкам (лабораторная работа № 1) определяют толщину пиломатериалов и приводят к стандартным значениям. На каждой доске согласно схеме на рис. 20 производят разметку мест внедрения электродов датчика влажности 6.

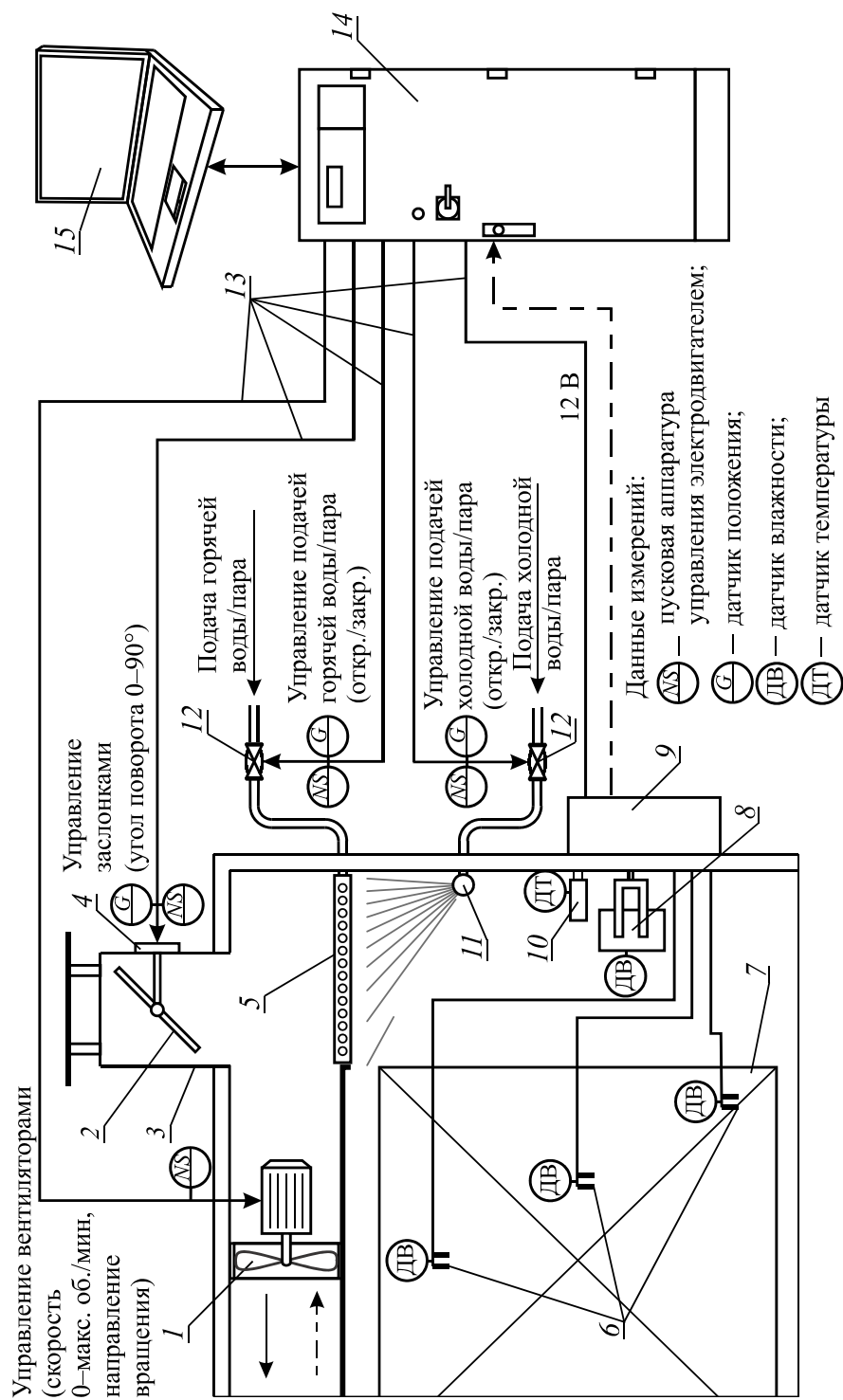


Рис. 19. Принцип работы системы автоматического управления камерой:

1 – вентилятор; 2 – заслонка; 3 – приточно-вытяжная труба; 4 – сервопривод заслонки; 5 – калорифер; 6 – электроды датчиков влажности древесины; 7 – штабель; 8 – датчик равновесной влажности (ЕМС); 9 – измерительный усилитель; 10 – датчик температуры сушильного агента; 11 – увлажнительная труба; 12 – вентиль с электроприводом; 13 – силовой кабель; 14 – регулятор KDM-E5; 15 – ПК с установленным ПО

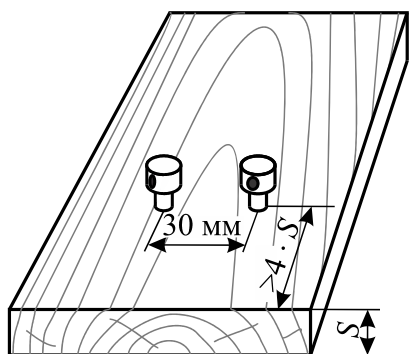


Рис. 20. Схема внедрения электродов

2.2.3. Электровлагомер Gann Hydromette НТ используют для измерения начальной влажности древесины по методике, описанной в лабораторной работе № 1, п. 2.4. Отверстия после извлечения игл влагомера используют для последующего внедрения (забивания при помощи молотка) электродов датчиков влажности древесины.

2.2.4. После вбивания электродов в древесину их необходимо подключить к измерительному устройству, связанному с измерительным усилителем 9. Подключение осуществляют аналогичным образом, как электроды электровлагомера Gann Hydromette НТ.

2.2.5. Включают ПК, после загрузки системы на рабочем столе находят и запускают программу KDM Engine для обеспечения связи с регулятором и эмуляции элементов управления, а затем программу KDM Browser, которая является оболочкой (графическим интерфейсом), адаптированной под пользователя.

Для разграничений функций пользователя и администратора браузер требует авторизации от оператора. Имя пользователя и пароль указаны в наклейке под дисплеем шкафа-регулятора. Выбирают локальный режим соединения и нажимают кнопку «Логин». Браузер стартует с домашней страницы, на которой списком отражены все камеры и средние значения измеряемых показателей.

### 2.3. Выбор и запуск автоматического режима сушки с ПК.

Вид домашней страницы программы KDM easy@full.control представлен на рис. 21.

2.3.1. По известной породе и толщине пиломатериалов делают выбор режима сушки. Для этого двойным щелчком мыши по пиктограмме 4 запускают меню «рабочая программа» и нажимают кнопку . Появляется список программ, имеющих специальный численный код внутри библиотеки. Программа выбирается по породе и толщине пиломатериала, согласно рис. 22.

Когда строка с режимом будет подсвечена желтым цветом, а кнопка выбора пород – серым, необходимо нажать на пиктограмму .

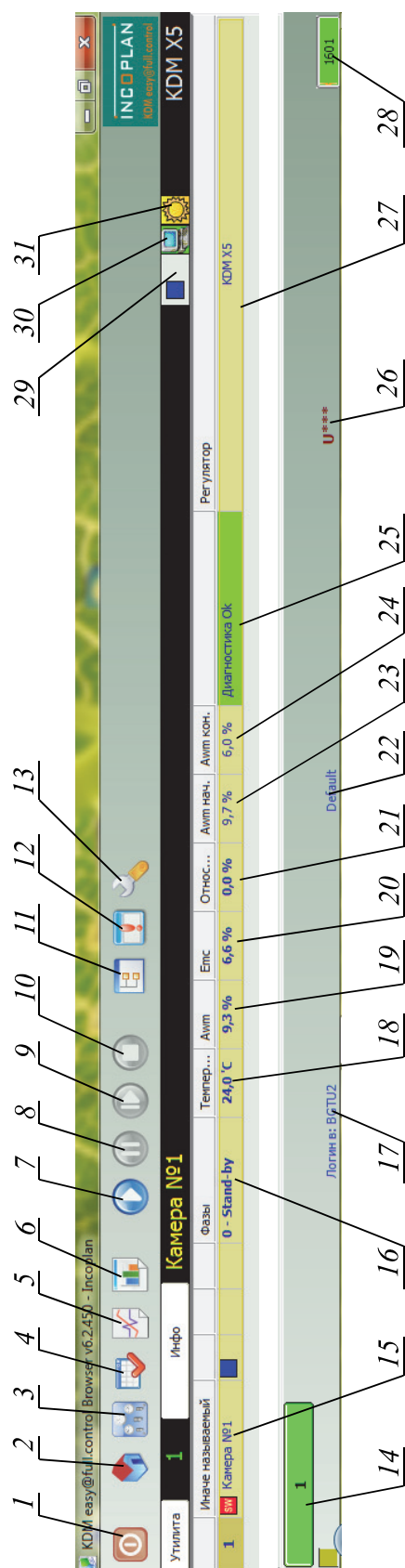


Рис. 21. Вид домашней страницы программы KDM easy@full control:

- 1 – выход из программы; 2 – домашняя страница программы; 3 – схема управления камерой;
- 4 – текущая программа сушки; 5 – графики сушки в реальном времени; 6 – графики сушки в архиве;
- 7 – кнопка запуска исполнения программы сушки; 8 – кнопка временной остановки программы сушки;
- 9 – кнопка возобновления программы сушки; 10 – кнопка прекращения программы сушки;
- 11 – список архивов процессов сушки; 12 – список действий над программой;
- 13 – выход в меню дополнительных функций (управление реверсом камеры, расписание времени работы вентиляторов, заводская конфигурация сушильного комплекса, администрирование библиотеки, настройка сети передачи данных, пользовательские настройки, психрометрические диаграммы связи основных показателей влажности воздуха);
- 14 – кнопка переключения между камерами; 15 – наименование камеры; 16 – текущая фаза сушки;
- 17 – имя пользователя; 18 – текущая температура; 19 – текущая средняя влажность древесины в камере;
- 20 – равновесная влажность древесины при текущих условиях окружающей среды;
- 21 – относительная влажность воздуха; 22 – информация о модификации программы;
- 23 и 24 – начальная и конечная средняя влажность древесины в камере; 25 – состояние первичной диагностики;
- 26 – статус пользователя; 27 – название регулятора, управляющего этой камерой; 28 – имя порта соединения;
- 29 – цветовой идентификатор камеры; 30 – тип управления камерой (дистанционный, локальный);
- 31 – тип гидротермической обработки (сушка, фитосанитарная обработка)

KDM easy@full.control Browser v6.2.450 - Incoplan

Камера №1

Выбрать программу

| Kod   | WG  | Russian                          | Scientific                             | English                 |
|-------|-----|----------------------------------|----------------------------------------|-------------------------|
| 13181 | 2.0 | Осина низкая влажность           | Populus euroamericana                  | Poplar 25%              |
| 13182 | 3.0 | Тополь белый                     | Populus alba, canescens, nigra, hybrid | Aspen                   |
| 13183 | 3.0 | Тополь белый 25%                 | Populus alba, canescens, nigra, hybrid | Aspen 25%               |
| 13200 | 2.0 | Липа                             | Pinus sylvestris                       | Pine Sylvestre          |
| 13201 | 2.0 | Липа низкая влажность            | Tilia cordata, platyphyllos            | Basswood 25%            |
| 14100 | 3.0 | ель белая                        | Abies alba                             | Fir White               |
| 14101 | 3.0 | ель белая низкая влажность       | Abies alba 25%                         | Fir White 25%           |
| 14150 | 3.0 | лиственница ( listvennitsa )     | Larix decidua                          | Larch european          |
| 14151 | 3.0 | лиственница ( listvennitsa ) 25% | Larix decidua                          | Larch 25%               |
| 14160 | 3.0 | лиственница сибирская            | Larix sibirica                         | Larch Syberian          |
| 14200 | 3.0 | сосна ( Sosna )                  | Pinus sylvestris                       | Pine Sylvestre          |
| 14201 | 3.0 | сосна 25% ( Sosna )              | Pinus sylvestris                       | Pine Sylvestre 25%      |
| 14210 | 3.0 | Белая Сосна                      | Pinus Strobus                          | Pine Strobo             |
| 14211 | 3.0 | Белая Сосна низкая влажность     | Pinus Strobus                          | Pine Strobo             |
| 1200  | 3.0 | сосна ( Sosna ) - HIFLOW         | Pinus Sylvestris - HIFLOW              | Pine Sylvestre - HIFLOW |
| 1250  | 3.0 | Каштан - HIFLOW                  | Castanea sativa - HIFLOW               | Chestnut - HIFLOW       |
| 1251  | 3.0 | орех - HIFLOW                    | Juglans regia - HIFLOW                 | Walnut - HIFLOW         |
| 1252  | 3.0 | дуб евро ( dub euro ) - HIFLOW   | Quercus robur, petraea - HIFLOW        | Oak european - HIFLOW   |
| 1253  | 2.0 | Бук белый цвет - HIFLOW          | Fagus sylvatica - HIFLOW               | Beech - HIFLOW          |

Тонкий (0...30mm)

Аннулировать

Средний (30...60mm)

Толстый (>60mm)

1

2

Рис. 22. Список программ сушки:

1 – выбор породы; 2 – выбор толщины пиломатериалов

2.3.2. После предыдущих действий на экран выходит окно с расписанием программы сушки, где отражаются все фазы и численные значения основных параметров сушки (рис. 23).

**Программа Редактировать** **Камера №1**

**Редактировать**

**сосна ( Sosna )** **14200**

**Pinus sylvestris**

|                   |                  |              |     |
|-------------------|------------------|--------------|-----|
| 30..60mm          | ✓                | Аwm кон.     | 6,0 |
| Плотность (Kg/... | 0,00             | Инверс.      | 3h  |
| WG                | 3,0              | Повыш. °/h   | 7,0 |
| Аwm сат.          | 32,0             | Повыш. EMC/h | 0,0 |
| Исчисл. Wm        | Среднее значение | Распис.      | ✗   |
| Метод влажн.      | Emc              | Сохран.      | ✗   |

|    | Продолж. | Аwm | Темпер. | Emc  | DG  | Вент. | d-Awm |
|----|----------|-----|---------|------|-----|-------|-------|
| 1  | 🔥        |     | 48,0    | 15,0 |     | 95    |       |
| 2  | 🕒        | 5h  | 53,0    | 17,0 |     | 90    |       |
| 3  | ☀️       |     | 50,0    | 48,0 | 2,1 | 100   |       |
| 4  | ☀️       |     | 35,0    | 50,0 | 2,3 | 95    |       |
| 5  | ☀️       |     | 26,0    | 54,0 | 2,4 | 90    |       |
| 6  | ☀️       |     | 20,0    | 58,0 | 7,1 | 85    |       |
| 7  | ☀️       |     | 14,0    | 62,0 | 3,2 | 80    |       |
| 8  | ☀️       |     | 8,0     | 65,0 | 3,1 | 75    |       |
| 9  | 🕒        | 18h | 58,0    | 7,0  |     | 85    |       |
| 10 | ❄️       |     | 30,0    |      |     | 95    |       |

**Аннулировать** **Ok**

Рис. 23. Окно расписания программы сушки:

- 1 – общие параметры программы сушки; 2 – номер фазы сушки;
- 3 – пиктограмма фазы сушки; 4 – продолжительность фазы;
- 5 – переходная влажность древесины; 6 – температура;
- 7 – устанавливаемая равновесная влажность; 8 – градиент сушки;
- 9 – процент от максимальной скорости вентилятора;
- 10 – значение пиктограмм (список активируется нажатием левой кнопки мыши в этой области);
- 11 – кнопка отмены выбора режима;
- 12 – кнопка подтверждения выбранного режима

2.3.3. Студент должен записать выбранный режим со всеми параметрами в лабораторный журнал.



2.3.9. После снятия всех данных необходимо остановить регулятор и закрыть программу. Регулятор останавливается нажатием кнопки временной остановки программы сушки 8 (рис. 21) в меню домашней страницы браузера, а затем кнопки прекращения программы сушки 10 (рис. 21) домашней страницы браузера. Стоит дождаться динамического окна «Разгрузка истории», которое отображается на момент стирания из памяти архивных данных по прекращаемой программе сушки. После сообщения «Разгрузка завершена» можно выйти из браузера при помощи нажатия кнопки выхода 1 (рис. 21) домашней страницы браузера. Для окончательного завершения сеанса работы следует в программе KDM Engine в левом верхнем углу нажать кнопку «Exit» с пиктограммой в виде красного креста.

#### **2.4. Выбор и запуск автоматического режима сушки с панели шкафа-регулятора.**

Вид панели шкафа-регулятора представлен на рис. 24, а вид дисплея в рабочем положении – на рис. 25.

2.4.1. Для перевода управления на шкаф-регулятор необходимо переключить режим управления с дистанционного на локальный. Для этого на панели шкафа-регулятора необходимо нажать кнопку  в группе функций 4 (рис. 24). В появившемся меню выбрать пункт «Блок» и в запросе ввести код из четырех цифр, указанных под панелью регулятора, нажать кнопку  в группе навигации 5 (рис. 24). В результате должно появиться сообщение: «Метод ЛОКАЛЬНЫЙ»

2.4.2. Чтобы выбрать режим сушки, соответствующий заданной породе и толщине, необходимо нажать кнопку  в группе функций 4 (рис. 24). Откроется описание последней выбранной программы сушки. При мигающем цифровом обозначении программы сушки с помощью клавиш навигации  и  в группе навигации 5 (рис. 24) выбирают подходящую породу древесины, затем кнопкой  переходят на выбор толщины пиломатериалов (значения толщин при этом будут мигать) и теми же клавишами навигации  и  выбирают подходящую толщину высушиваемых пиломатериалов. Для подтверждения нажимают кнопку .

2.4.3. После нажатия кнопки  на экран постадийно выводится расписание программы сушки, начиная с 1-й стадии, которая отображается сразу после нажатия кнопки. Просмотреть каждую последующую стадию можно при помощи клавиш навигации  и .

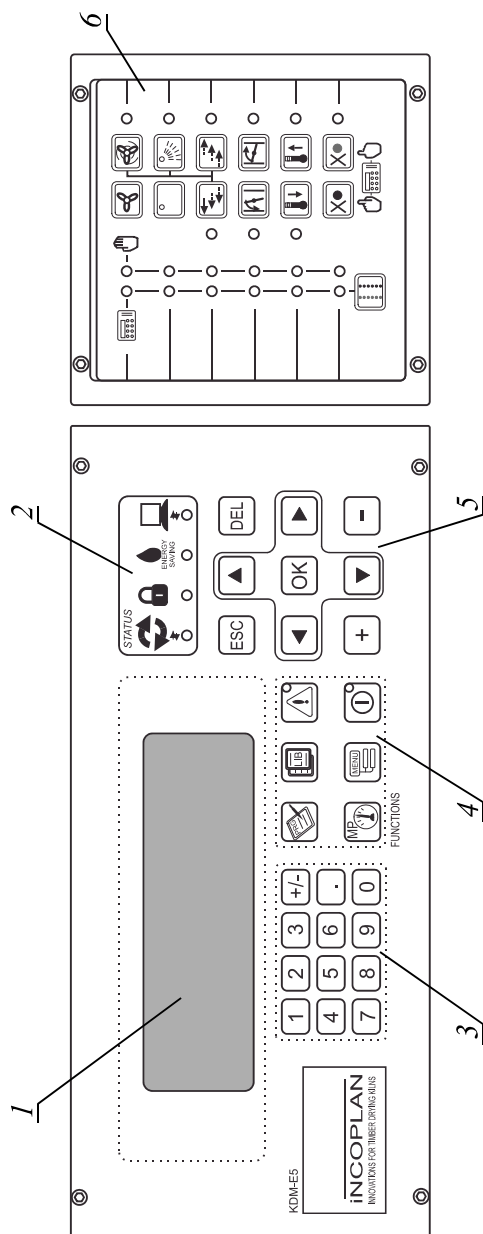


Рис. 24. Вид панели шкафа-регулятора:

1 – дисплей; 2 – панель состояния (слева направо: память контроллера, контроль дистанционный/локальный, энергосбережение, загрузка информации с ПК); 3 – мини-клавиатура; 4 – панель функций (слева направо, сверху вниз: кнопка «Программа», позволяющая просматривать и изменять значения параметров сушки при выполнении заданной программы; кнопка «Библиотека», позволяет войти в библиотеку режимов сушки и выбрать подходящий для исходного материала режим сушки или записать в нее текущий режим; кнопка со светодиодом «Тревога» позволяет вывести на дисплей причину опасности, в результате которой загорелась сигнальная лампочка; кнопка «Датчики» позволяет просмотреть показания всех «зондов», установленных в камере, таких как «зонды» температуры и влажности внутри и на поверхности пиломатериала, климатические, т. е. температурные, его относительная влажность, равновесная влажность ЕМС; кнопка «Меню» обеспечивает вход в иерархическое меню регулятора, содержащее области:

блок – заблокировать доступ к регулятору и обеспечить дистанционное управление только с ПК, тест – искать неполадки регулятора дистанционно, камера – задать номер камеры для наблюдения за ней в случае, если к одному регулятору подключены несколько камер, инфо – узнать конфигурацию регулятора, язык – выбрать язык интерфейса; кнопка «Управление процессом» позволяет запускать, останавливать и ставить на паузу процесс сушки, а также запускать любую ее фазу по усмотрению пользователя);

5 – панель навигации; 6 – панель пользовательской корректировки программы сушки

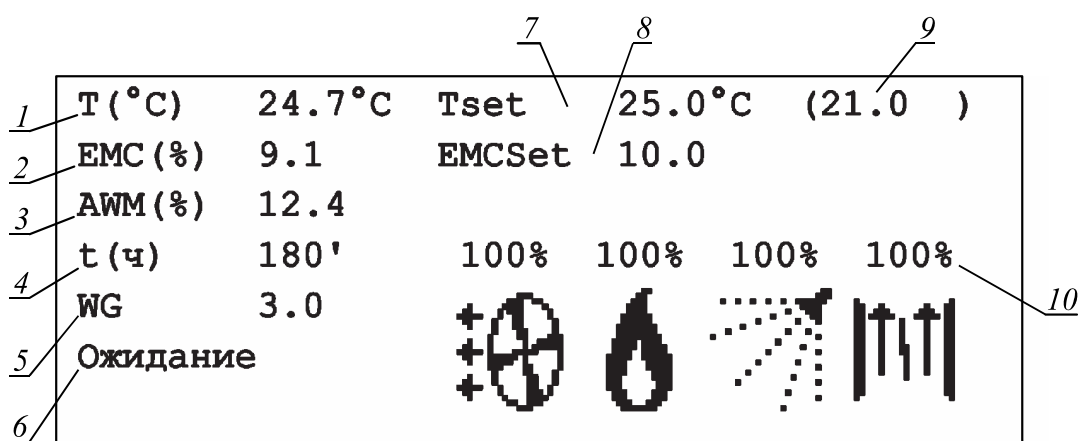


Рис. 25. Вид дисплея шкафа-регулятора в рабочем положении:

- 1 – текущая температура; 2 – текущее значение равновесной влажности EMC;  
 3 – текущая влажность древесины; 4 – оставшееся до завершения стадии время (может не высвечиваться); 5 – группа древесины по влажности;  
 6 – текущая стадия; 7 – заданная температура (максимум 75°C);  
 8 – заданная равновесная влажность EMC (максимум 19%);  
 9 – заданная допустимая температура (отображается только тогда, когда отличается от заданной);  
 10 – параметры приводов (слева направо: вентилятора, вентиля калорифера, вентиля увлажнительных труб, приточно-вытяжных труб) (максимум 100%)

2.4.4. Для передачи команды на запуск программы сушки необходимо нажать кнопку «Управление процессом» .

2.4.5. На экране появятся два варианта действий, следует выбрать «Запуск с любой фазы» (второй вариант), при помощи клавиши . При этом название выбранного варианта будет мигать. Для подтверждения нажимают кнопку .

2.4.6. После предпринятых действий на экран выводится текст «Запуск сушки с фазы...001». Пользователь может начать процесс с любой из них, для чего необходимо при помощи цифр мини-клавиатуры 3 (рис. 24) ввести два ноля, а затем цифру, соответствующую цифре выбранной стадии по выбранному режиму. При неудачном вводе всегда можно вернуться на предыдущий уровень диалога, нажав кнопку  в группе навигации 5 (рис. 24). Для подтверждения выбранной стадии (номер ее на экране мигает) нажимают кнопку . После этого процесс сушки запущен.

2.4.7. Дальнейшие действия аналогичны п. 2.3.8.

2.4.8. После снятия всех данных необходимо остановить регулятор нажатием кнопки «Управление процессом» . В этом случае

в верху экрана появляется надпись «Проверка сушки» и мигает текст «Пауза». Для подтверждения остановки регулятора нажимают кнопку . В режиме «Пауза» регулятор отключит все приводы и будет контролировать только параметры датчиков. Индикатор кнопки «Управление процессом»  будет при этом мигать и на экране в рабочем положении после наименования текущей стадии 6 (рис. 25) в скобках будет надпись «Пауза».

2.4.9. Повторяют нажатие кнопки «Управление процессом» . В этом случае в верху экрана появляются надпись «Проверка сушки» и два варианта для выбора: мигающий текст «Возобновить» и правее «Стоп». При помощи кнопки  «заставляем» мигать текст «Стоп» и подтверждаем выбранный вариант нажатием кнопки . Индикатор кнопки «Управление процессом»  погаснет и на экране в рабочем положении вместо наименования текущей стадии 6 (рис. 25) будет текст «Ожидание». Теперь регулятор (процесс сушки) остановлен.

## **2.5. Анализ полученных результатов.**

2.5.1. По данным режимов строят графики изменения влажности древесины (AWM), равновесной влажности (EMC), градиента сушки (DG) и температуры сушильного агента на различных ступенях сушки.

2.5.2. По данным таблицы строят графики значений мощности приводов на различных ступенях сушки.

2.5.3. Анализируют тенденцию к возрастанию или убыванию значений показателей, определяют пиковые значения и объясняют их причины.

## **3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Каким образом в сушильных камерах можно регулировать состояние сушильного агента?

2. Какие операции включает технологический процесс камерной сушки пиломатериалов? Какова последовательность и назначение каждой операции?

3. Что такое режим сушки? Какими параметрами характеризуется состояние сушильного агента?

4. Какие существуют режимы сушки?
5. Как следует понимать многоступенчатость структуры режимов сушки? Что такое переходная влажность?
6. Для чего нужны начальный прогрев, конечная и промежуточная влаготеплообработка, кондиционирование, охлаждение?
7. Каков принцип работы системы автоматического регулирования процесса сушки?
8. Как измеряется влажность древесины при использовании автоматической системы управления?
9. Как измеряется влажность воздуха в сушильной камере? Какие приборы для этого используют?
10. Какие группы толщин пиломатериалов выделяют при выборе режима сушки? Какие интервалы толщин пиломатериалов включает каждая группа?
11. Какие устройства сушильной камеры выполняют команды регулятора по изменению климатических параметров?

## **ИЗУЧЕНИЕ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Цель работы:* изучение свойств циркуляционного оборудования, овладение навыками измерения скорости сушильного агента.

### **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Для создания внутри сушильного пространства организованной циркуляции агента сушки используется циркуляционное оборудование. К нему относятся вентиляторы, вентиляторные установки, эжекторные установки.

#### **1.1. Вентиляторы. Вентиляторные установки.**

Вентиляторы – это воздуходувные машины, предназначенные для перемещения больших количеств воздуха или газа при давлении, близком к атмосферному. По конструкции и принципу действия вентиляторы разделяют на два класса: осевые и радиальные (центробежные).

*Осевой* вентилятор (рис. 26) представляет собой насаженную на вал 4 ступицу 1, по окружности которой закреплены плоские или профильные лопасти 2.

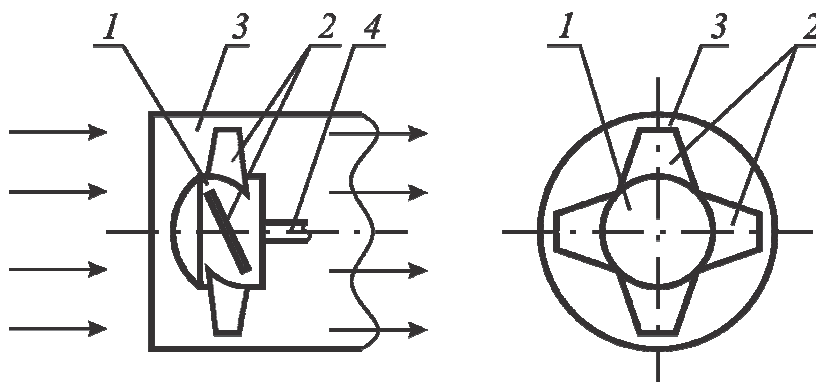


Рис. 26. Осевой вентилятор:

1 – ступица; 2 – лопасти; 3 – кожух; 4 – вал

Вал, ступица и лопасти вместе называются рабочим колесом (ротором). Рабочее колесо вращается внутри цилиндрического кожуха 3. Вентилятор работает по принципу воздушного винта, перемещая воздух в направлении оси вращения рабочего колеса.

*Центробежный вентилятор* (рис. 27) состоит из кожуха 1 спиральной (улиткообразной) формы, внутри которого вращается цилиндрический или лопастной ротор 2. Воздух перемещается вентилятором под действием центробежного эффекта. Через всасывающий патрубок 3, смонтированный на боковой стенке кожуха, воздух попадает в середину ротора, вовлекается во вращательное движение, отбрасывается центробежной силой к внутренней поверхности кожуха и через выхлопной патрубок 4 выбрасывается из вентилятора.

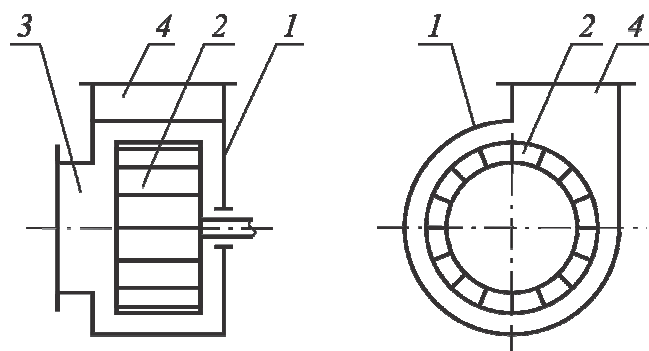


Рис. 27. Центробежный вентилятор:

1 – кожух; 2 – рабочее колесо (ротор);

3, 4 – всасывающий и выхлопной патрубки

Осевые и центробежные вентиляторы могут быть правого и левого вращения. Ротор вентилятора правого вращения при наблюдении со стороны всасывания движется по часовой стрелке, а левого – против часовой стрелки.

Осевые и центробежные вентиляторы в зависимости от принятой аэродинамической схемы и конструкции рабочего колеса подразделяются на типы. Для установки в лесосушильных камерах рекомендуются осевые вентиляторы типов У-6, У-12 и В, радиальные – типов Ц4-70 и Ц4-75. Вентиляторам одного типа присваиваются номера в зависимости от размеров. Номер вентилятора определяет диаметр рабочего колеса в дециметрах. В практике сушки древесины используются в основном вентиляторы следующих номеров: 4; 5; 6,3; 8; 10; 12; 12,5; 16; 20.

Работа вентилятора характеризуется аэродинамическими и конструктивными параметрами, основными из которых являются полное давление, развиваемое вентилятором; производительность; частота вращения рабочего колеса; мощность, потребляемая вентилятором; коэффициент полезного действия. Давление, развиваемое вентилятором, его производительность и коэффициент полезного действия зависят от частоты вращения рабочего колеса и аэродинамического сопротивления подключенной к нему системы воздухопроводов. График, на котором нанесены кривые зависимости давления от производительности, полученные при разных частотах вращения рабочего колеса, называется *характеристикой вентилятора*.

Центробежный или осевой вентилятор с приводом и системой подключенных к нему воздухопроводов называют *вентиляторной установкой*. Форма и размеры воздухопроводов определяются конструкцией конкретного сушильного устройства. Они могут состоять из труб всевозможных сечений и могут быть выполнены в виде каналов, сформированных элементами ограждений сушилок, экранами и высушиваемым материалом. Система воздухопроводов вентиляторной установки может быть незамкнутой и замкнутой (рис. 28).

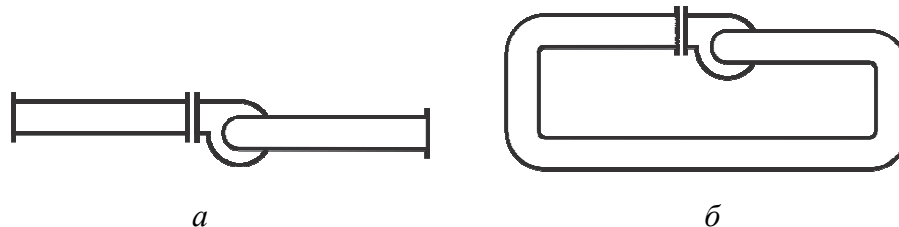


Рис. 28. Системы воздухопроводов:  
а – незамкнутая; б – замкнутая

Незамкнутая система состоит из всасывающего и нагнетательного воздухопроводов, подключенных к соответствующим патрубкам вентилятора. Вентилятор работает на выхлоп. В такой системе давление вентилятора равно сумме сопротивлений движению воздуха на участках воздуховода и динамического напора воздуха в выхлопном отверстии:

$$H = \sum \Delta h + h_{\text{д}}, \quad (64)$$

где  $H$  – давление, развиваемое вентилятором, Па;  $\sum \Delta h$  – суммарные потери давления в воздуховодах, Па;  $h_{\text{д}}$  – динамический напор в выхлопном отверстии, Па.

У замкнутой системы воздуховодов всасывающая ветвь является продолжением нагнетательной ветви, и четкой границы между ними не существует. Полное давление вентилятора в этом случае определяется только сопротивлением системы, т. е. потерей давления в воздуховодах:

$$H = \sum \Delta h. \quad (65)$$

Динамический напор воздуха в выхлопном отверстии определяют по формуле

$$h_d = \frac{\rho \cdot V_b^2}{2}, \quad (66)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V_b$  – скорость воздуха в выхлопном отверстии, м/с.

Потери давления на отдельных участках воздуховодов определяют по формуле

$$\Delta h = \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot \xi, \quad (67)$$

где  $\Delta h$  – потеря давления на участке, Па;  $V$  – скорость воздуха на участке, м/с;  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент местного сопротивления прямолинейных участков находят, используя выражение

$$\xi = \frac{f \cdot L \cdot P}{4 \cdot F}, \quad (68)$$

где  $f$  – коэффициент трения воздуха о стенки воздуховода, м ( $f = 0,016$  – для металлических каналов,  $0,04$  – для кирпичных неоштукатуренных каналов,  $0,03$  – для оштукатуренных);  $L$  – длина прямолинейного участка, м;  $P$  – периметр сечения канала, м;  $F$  – площадь сечения канала в плоскости, перпендикулярной потоку воздуха, м<sup>2</sup>.

Значения коэффициентов местного сопротивления для сужения и расширения потока, а также для поворота (колена) приведены в таблицах приложения 13.

Скорость воздуха на отдельных участках определяют, исходя из условия постоянства его расхода через любое сечение воздуховода:

$$V_i \cdot F_i = Q = \text{const} \Rightarrow V_i = \frac{Q}{F_i}, \quad (69)$$

где  $V_i$  – скорость воздуха на участке, м/с;  $F_i$  – площадь поперечного сечения воздухопровода на участке, м<sup>2</sup>;  $Q$  – расход воздуха (производительность вентилятора), м<sup>3</sup>/с.

### 1.2. Эжекторные установки.

Наряду с вентиляторными установками для осуществления циркуляции сушильного агента в камерах могут использоваться эжекторные установки. Принцип действия этих установок основан на эффекте эжекции, т. е. подсоса, создаваемого струей движущегося с большой скоростью воздуха. Эжектор (рис. 29) состоит из трубы большого диаметра 3, в которую вставлена труба меньшего диаметра 1 с конической насадкой 2.

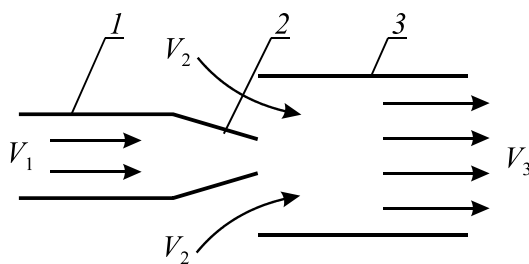


Рис. 29. Эжектор:

1, 3 – трубы малого и большого диаметра;  
2 – коническая насадка

По трубе меньшего диаметра перемещается воздух в количестве  $V_1$ , который в конической насадке резко ускоряется. При увеличении скорости его движения динамический напор в зоне выхода из сопла увеличивается, а статический напор воздушного потока соответственно уменьшается. За счет этого во входном отверстии трубы большого диаметра 3 образуется разрежение. Вследствие чего из окружающего пространства в трубу будет засасываться воздух в количестве  $V_2$  и смешиваться с воздухом, вышедшим из насадки. Суммарное количество воздуха, движущегося по трубе 3, будет равно

$$V_3 = V_1 + V_2. \quad (70)$$

Отношение объема воздуха  $V_3$ , циркулирующего через основную трубу, к количеству эжектирующего воздуха  $V_1$  называется кратностью эжекции:

$$m = \frac{V_3}{V_1}. \quad (71)$$

Кратность эжекции в сушильных камерах должна быть в пределах 4–6, для чего требуется скорость выхлопа воздуха из насадок не менее 25–30 м/с.

## **2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ № 11**

---

### **2.1. Материалы, приборы, инструменты:**

- вентиляторная установка с центробежным вентилятором;
- анемометр крыльчатый АСО-3;
- анемометр чашечный МС-13;
- термоанемометр ЭА-2М;
- психрометр;
- барометр;
- рулетка (линейка);
- секундомер.

### **2.2. Подготовка вентиляторной установки.**

2.2.1. Схема лабораторной вентиляторной установки изображена на рис. 30. Установка состоит из центробежного вентилятора ВР-3 № 4 (1), всасывающего 3 и нагнетательного 4 воздуховодов. На каждом участке воздуховодов имеются отверстия для измерения скорости воздуха. Электродвигатель 2 привода вентилятора имеет мощность  $N = 1$  кВт и частоту вращения  $n = 930 \text{ мин}^{-1}$ .

2.2.2. Измеряют диаметр воздуховодов и рассчитывают площадь сечений, отмеченных на рис. 30. Результаты измерений и расчетов заносят в табл. 26.

2.2.3. Включение вентиляторной установки осуществляют с помощью пускателя 5.

### **2.3. Измерение скорости воздуха крыльчатым анемометром.**

2.3.1. Знакомятся с устройством, принципом действия и правилами эксплуатации крыльчатого анемометра. Инструкцию по эксплуатации прибора получают у преподавателя.

2.3.2. Замеры скорости воздуха производят во всех сечениях вентиляторной установки, отмеченных на рис. 30. Значение скорости воздуха, определенное с помощью крыльчатого анемометра, записывают в табл. 26.

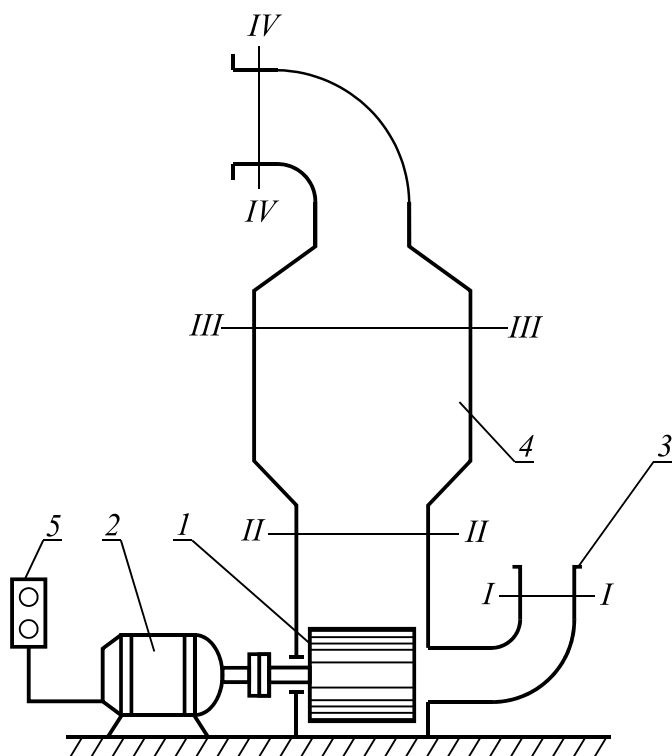


Рис. 30. Лабораторная вентиляторная установка:  
 1 – центробежный вентилятор; 2 – электродвигатель;  
 3 – всасывающий воздуховод;  
 4 – нагнетательный воздуховод; 5 – пускатель;  
 I–IV – сечения воздуховода

Таблица 26

**Результаты определения скорости и расхода воздуха  
 в воздуховодах вентиляторной установки**

| Параметры                                                     | Сечение воздуховода |    |     |    |
|---------------------------------------------------------------|---------------------|----|-----|----|
|                                                               | I                   | II | III | IV |
| 1. Диаметр воздуховода, м                                     |                     |    |     |    |
| 2. Площадь сечения, м <sup>2</sup>                            |                     |    |     |    |
| 3. Скорость воздуха, м/с, определенная:                       |                     |    |     |    |
| – крыльчатым анемометром                                      |                     |    |     |    |
| – чашечным анемометром                                        |                     |    |     |    |
| – термоанемометром                                            |                     |    |     |    |
| 4. Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с, определенный с помощью: |                     |    |     |    |
| – крыльчатого анемометра                                      |                     |    |     |    |
| – чашечного анемометра                                        |                     |    |     |    |
| – термоанемометра                                             |                     |    |     |    |

2.3.3. При использовании аналогового (нецифрового) прибора измерения проводят согласно п. 2.4, при этом крыльчатку располагают перпендикулярно потоку.

#### **2.4. Измерение скорости воздуха чашечным анемометром.**

2.4.1. Знакомятся с устройством, принципом действия и правилами эксплуатации чашечного анемометра. Инструкцию по эксплуатации прибора получают у преподавателя.

2.4.2. С помощью арретира, находящегося в нижней части циферблата, выключают счетный механизм прибора и фиксируют начальные показания счетчика по всем трем шкалам  $a_1$ .

2.4.3. Открывают нужное отверстие в воздуховоде и устанавливают анемометр в центре потока воздуха так, чтобы плоскость вращения крестовины с чашками была параллельна потоку. Через 10–15 с включают анемометр и одновременно секундомер. По истечении 1–2 мин анемометр и секундомер одновременно выключают. Снимают показания счетчика анемометра после замера  $a_2$ .

2.4.4. Рассчитывают число оборотов крестовины за 1 с по формуле

$$n_k = \frac{a_2 - a_1}{\tau}, \quad (72)$$

где  $n_k$  – частота вращения крестовины,  $\text{с}^{-1}$ ;  $a_1$ ,  $a_2$  – показания счетчика анемометра до и после замера;  $\tau$  – время проведения измерения, с.

2.4.5. Определяют скорость потока воздуха по тарифовочному графику анемометра, результаты заносят в табл. 27.

#### **2.5. Измерение скорости воздуха с помощью термоанемометра ЭА-2М.**

2.5.1. Схема термоанемометра ЭА-2М представлена на рис. 31. Измеритель 1 прибора устанавливают на жестком горизонтальном основании. Оставляя датчик 9 в пенале, подключают его к измерителю. Для этого вставляют разъем 16 в гнездо 3. Датчик при этом должен располагаться горизонтально, а терморезисторы 12 должны быть закрыты защитным футляром 13.

2.5.2. Переключатель 5 устанавливают в положение «А», а переключатель 6 – в положение «Контроль». Ручкой 7 устанавливают стрелку микроамперметра 2 на максимальное значение.

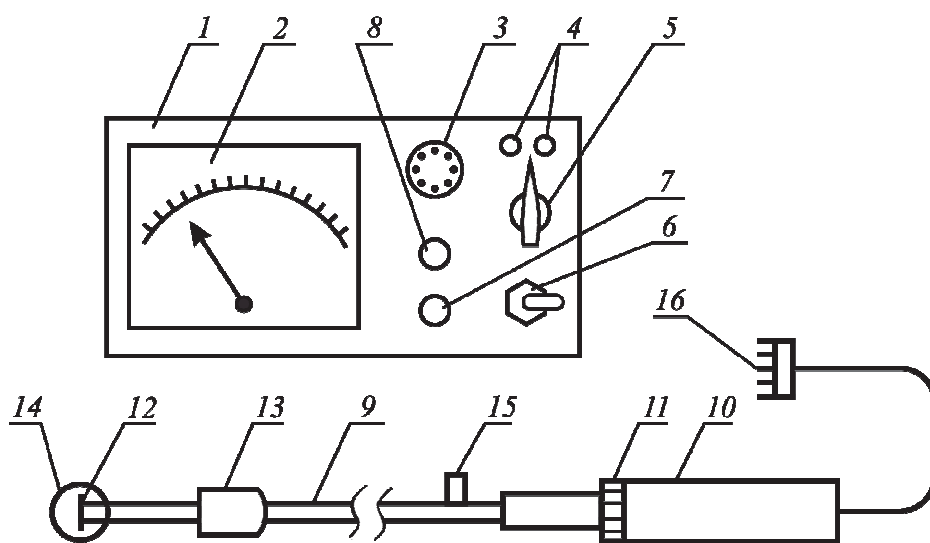


Рис. 31. Термоанемометр ЭА-2М:

- 1 – измеритель; 2 – микроамперметр; 3 – гнездо;  
 4 – клеммы для подключения внешнего источника питания;  
 5, 6 – переключатели; 7, 8 – ручки настройки; 9 – датчик; 10 – ручка;  
 11 – угловой лимб; 12 – терморезисторы; 13 – футляр терморезисторов;  
 14 – цилиндрическая обечайка; 15 – упор; 16 – разъем

2.5.3. Переводят переключатель 6 в положение «Измерение». Плавное вращая ручку 8, выводят стрелку микроамперметра на максимальное значение.

2.5.4. Извлекают датчик из пенала. С помощью упора 15 сдвигают защитный футляр 13, освобождая терморезисторы 12. Помещают терморезисторы датчика в измеряемый поток воздуха.

Таблица 27

### Результаты измерения скорости воздуха чашечным анемометром

| Параметры                                                 | Сечение воздуховода |    |     |    |
|-----------------------------------------------------------|---------------------|----|-----|----|
|                                                           | I                   | II | III | IV |
| 1. Показания счетчика анемометра до замера ( $a_1$ )      |                     |    |     |    |
| 2. Показания счетчика анемометра после замера ( $a_2$ )   |                     |    |     |    |
| 3. Время замера ( $\tau$ ), с                             |                     |    |     |    |
| 4. Частота вращения крыльчатки ( $n_k$ ), $\text{с}^{-1}$ |                     |    |     |    |
| 5. Скорость воздуха, м/с                                  |                     |    |     |    |

2.5.5. Удерживают левой рукой угловой лимб 11 в фиксированном положении, а правой рукой плавно поворачивают ручку 10. Датчик при этом вращается вокруг своей оси. Находят положение

датчика, при котором микроамперметр измерителя показывает минимальное значение тока.

2.5.6. Фиксируют достигнутое минимальное значение тока и по градуировочной зависимости определяют скорость воздушного потока.

2.5.7. Проводят измерения по п. 2.5.4–2.5.6 во всех сечениях, отмеченных на рис. 30. Результаты определения скорости воздуха заносят в табл. 26.

2.5.8. Ручки 7 и 8 возвращают в исходное положение, вращая их против часовой стрелки. Переключатель 6 переводят в положение «Контроль», а переключатель 5 – в положение «В». Закрывают терморезисторы 12 защитным футляром 13. Датчик укладывают в пенал.

2.5.9. При использовании цифрового термоанемометра достаточно снять показания с экрана. Однако прежде чем приступить к его использованию, знакомятся с устройством, принципом действия и правилами эксплуатации термоанемометра из инструкции по эксплуатации прибора, полученной у преподавателя.

## 2.6. Определение основных параметров вентилятора.

2.6.1. Выясняют у преподавателя, какие результаты измерения скорости и расхода воздуха, зафиксированные в табл. 26, будут использованы для выполнения расчетов. Соответствующие значения скорости и расхода заносят в табл. 28 и 29.

2.6.2. По таблице приложения 13 определяют значения коэффициентов местных сопротивлений и заносят их в табл. 28.

Таблица 28

### Определение потерь давления в воздуховодах вентиляторной установки

| Участки воздуховодов                     | Коэффициент местного сопротивления | Расчетная скорость воздуха, м/с | Потеря давления, Па |
|------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| Всасывающий воздуховод                   |                                    |                                 |                     |
| 1. Вход в воздуховод                     |                                    |                                 |                     |
| 2. Поворот под углом 90°                 |                                    |                                 |                     |
| 3. Вентилятор                            |                                    |                                 |                     |
| Нагнетательный воздуховод                |                                    |                                 |                     |
| 4. Расширение                            |                                    |                                 |                     |
| 5. Сужение                               |                                    |                                 |                     |
| 6. Поворот под углом 90°                 |                                    |                                 |                     |
| Суммарные потери давления в воздуховодах |                                    |                                 |                     |

Таблица 29

**Определение основных параметров вентилятора**

| Параметры                                                                          | Значения параметров |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1. Скорость воздуха в сечении IV, м/с                                              |                     |
| 2. Динамический напор воздуха в выхлопном отверстии, Па                            |                     |
| 3. Суммарные потери давления в воздуховодах, Па                                    |                     |
| 4. Давление, развиваемое вентилятором, Па                                          |                     |
| 5. Производительность вентилятора (расход воздуха в сечении IV), м <sup>3</sup> /с |                     |
| 6. Коэффициент полезного действия                                                  |                     |

2.6.3. С помощью барометра определяют барометрическое давление в лаборатории. Снимают показания психрометра и определяют значение относительной влажности воздуха. По таблице приложения 14 находят давление насыщенного водяного пара при температуре сухого термометра психрометра. Рассчитывают плотность воздуха в лаборатории по формуле

$$\rho = \frac{353 \cdot B}{10^5 \cdot (t_c + 273)} \cdot \left( 1 - \frac{0,378 \cdot \phi \cdot P_n}{B} \right), \quad (73)$$

где  $B$  – барометрическое давление, Па;  $t_c$  – температура сухого термометра психрометра, °С;  $\phi$  – относительная влажность воздуха в лаборатории;  $P_n$  – давление насыщенного водяного пара при температуре  $t_c$ , Па.

2.6.4. По формуле (67) рассчитывают потери давления на местных сопротивлениях, а также суммарные потери давления в воздуховодах. Результаты расчетов заносят в табл. 28 и 29.

2.6.5. По формуле (66) рассчитывают динамический напор воздуха в выхлопном отверстии вентиляторной установки, а по формуле (64) – давление, развиваемое вентилятором.

2.6.6. Определяют коэффициент полезного действия вентилятора по формуле

$$\eta_b = \frac{H \cdot V_b \cdot K_N \cdot K_T}{N_{дв} \cdot \eta_{п}}, \quad (74)$$

где  $H$  – давление, развиваемое вентилятором, Па;  $V_b$  – производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с;  $K_N$  – коэффициент запаса мощности

( $K_N = 1,25$ );  $K_T$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры среды ( $K_T = 1,05$ );  $N_{дв}$  – мощность электродвигателя, Вт;  $\eta_n$  – коэффициент полезного действия передачи ( $\eta_n = 0,95$ ).

2.6.7. Результаты расчетов по п. 2.6.5 и 2.6.6 сводят в табл. 29.

### **2.7. Анализ полученных результатов.**

2.7.1. Анализируют данные табл. 26. Сравнивают значения скорости воздуха, полученные в результате применения различных анемометров. Делают вывод о точности приборов. Сравнивают затраты времени и трудоемкость изученных методов измерения скорости воздуха.

2.7.2. Проводят анализ табл. 28. Сопоставляют потери давления на различных местных сопротивлениях воздухопроводов. Делают заключение об их значимости в суммарных потерях давления.

2.7.3. По данным табл. 29 анализируют параметры работы вентилятора. Сравнивают динамическую и статическую составляющие напора при различных расходах воздуха.

## **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ № 12**

---

### **3.1. Материалы, приборы, инструменты:**

- эжекторная установка с осевым вентилятором;
- анемометр крыльчатый АСО-3;
- анемометр чашечный МС-13;
- термоанемометр ЭА-2М;
- рулетка (линейка);
- секундомер.

### **3.2. Подготовка эжекторной установки.**

3.2.1. Схема лабораторной эжекторной установки представлена на рис. 32. Установка состоит из распределительного канала 3, имеющего форму усеченного конуса, в который вмонтированы конические насадки 4. Воздух в распределительный канал подает осевой вентилятор 1, приводимый во вращение электродвигателем 2.

3.2.2. Определяют количество насадок эжекторной установки. Измеряют диаметр выхлопных отверстий. Рассчитывают площадь одного выхлопного отверстия и суммарную площадь отверстий всех насадок.

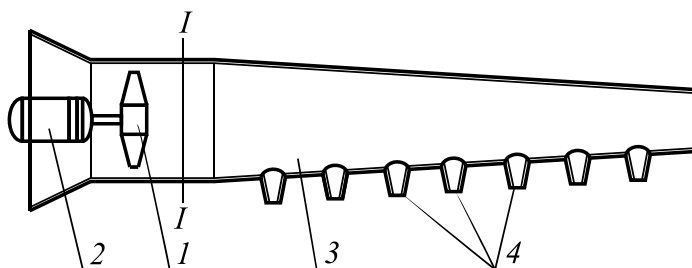


Рис. 32. Лабораторная эжекторная установка:  
1 – осевой вентилятор; 2 – электродвигатель;  
3 – распределительный канал; 4 – насадки (сопла)

3.2.3. Измеряют диаметр распределительного канала в сечении I и рассчитывают площадь этого сечения. Результаты измерений и расчетов записывают в табл. 30.

Таблица 30

**Результаты определения параметров эжекторной установки**

| Параметр                                                                         | Значение |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1. Количество насадок, шт.                                                       |          |
| 2. Диаметр выхлопных отверстий насадок, м                                        |          |
| 3. Площадь выхлопного отверстия одной насадки, $\text{м}^2$                      |          |
| 4. Суммарная площадь отверстий всех насадок, $\text{м}^2$                        |          |
| 5. Суммарный расход эжектирующего воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$ , определенный: |          |
| – крыльчатый анемометром                                                         |          |
| – чашечным анемометром                                                           |          |
| – термоанемометром                                                               |          |
| 6. Диаметр распределительного канала, м                                          |          |
| 7. Площадь сечения распределительного канала, $\text{м}^2$                       |          |
| 8. Скорость воздуха в распределительном канале, м/с                              |          |

**3.3. Измерение скорости воздуха крыльчатым анемометром.**

Измерение производят в соответствии с п. 2.3.1–2.3.5 лабораторной работы № 11 для всех насадок установки. Во время замера анемометр устанавливают на расстоянии 10 мм от сопла таким образом, чтобы плоскость вращения крыльчатки была перпендикулярна потоку воздуха. Результаты измерений и расчетов заносят в табл. 31.

Таблица 31

**Результаты определения скорости воздуха  
крыльчатым анемометром и расхода воздуха**

| Параметры                                               | Насадки распределительного канала |   |   |   |   |   |   |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------|---|---|---|---|---|---|
|                                                         | 1                                 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1. Показания счетчика анемометра до замера ( $a_1$ )    |                                   |   |   |   |   |   |   |
| 2. Показания счетчика анемометра после замера ( $a_2$ ) |                                   |   |   |   |   |   |   |
| 3. Время замера ( $\tau$ ), с                           |                                   |   |   |   |   |   |   |
| 4. Частота вращения крыльчатки ( $n_k$ ), $c^{-1}$      |                                   |   |   |   |   |   |   |
| 5. Скорость воздуха, м/с                                |                                   |   |   |   |   |   |   |
| 6. Расход воздуха, $m^3/c$                              |                                   |   |   |   |   |   |   |

**3.4. Измерение скорости воздуха чашечным анемометром.**

Процедура измерения такая же, как и в случае применения крыльчатого анемометра. Реализуется она последовательным выполнением п. 2.3.1–2.3.5 лабораторной работы № 11 и заполнением таблицы, аналогичной табл. 31.

**3.5. Измерение скорости воздуха термоанемометром.**

Измерение проводят в соответствии с пп. 2.5.1–2.5.8 лабораторной работы № 11. Результаты измерений записывают в табл. 32.

Таблица 32

**Результаты определения скорости воздуха  
термоанемометром и расхода воздуха**

| Параметры                             | Насадки распределительного канала |   |   |   |   |   |   |
|---------------------------------------|-----------------------------------|---|---|---|---|---|---|
|                                       | 1                                 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1. Показания микроамперметра, $\mu A$ |                                   |   |   |   |   |   |   |
| 2. Скорость воздуха, м/с              |                                   |   |   |   |   |   |   |
| 3. Расход воздуха, $m^3/c$            |                                   |   |   |   |   |   |   |

**3.6. Определение кратности эжекции.**

3.6.1. Выясняют у преподавателя, какой метод измерения скорости воздуха будет использован при определении кратности эжекции.

3.6.2. К одной из насадок подносят эжекционную трубу большого диаметра так, как это показано на рис. 33.

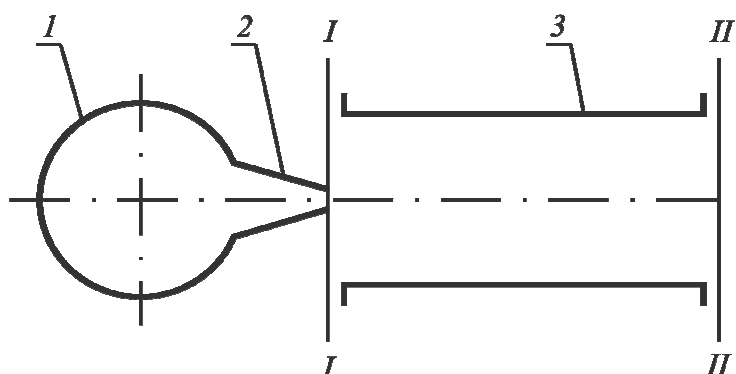


Рис. 33. Схема опыта по определению кратности эжекции:

1 – распределительный канал; 2 – коническая насадка;  
3 – эжекционная труба

3.6.3. Выбранным методом определяют скорость воздуха в сечениях I и II. Рассчитывают в этих же сечениях расход воздуха по формуле (70), а по формуле (71) – кратность эжекции. Результаты измерений и расчетов заносят в табл. 33.

Таблица 33

**Результаты определения кратности эжекции**

| Количество<br>перекрытых<br>насадок | Скорость воздуха<br>в сечении, м/с |    | Расход воздуха<br>в сечении, м <sup>3</sup> /с |    | Кратность<br>эжекции |
|-------------------------------------|------------------------------------|----|------------------------------------------------|----|----------------------|
|                                     | I                                  | II | I                                              | II |                      |
| 0                                   |                                    |    |                                                |    |                      |
| 1                                   |                                    |    |                                                |    |                      |
| ...                                 |                                    |    |                                                |    |                      |
| 6                                   |                                    |    |                                                |    |                      |

3.6.4. Последовательно перекрывают пробками отверстия одной, двух, трех и остальных насадок, увеличивая тем самым скорость истечения воздуха из отверстия насадки, используемой в опыте. Для каждого варианта работы эжекционной установки определяют расход воздуха в сечениях I и II, рассчитывают кратность эжекции. Полученные результаты заносят в табл. 33.

3.6.5. Строят графическую зависимость кратности эжекции от скорости истечения воздуха из насадки (скорости воздуха в сечении I).

### 3.7. Анализ полученных результатов.

3.7.1. Анализируют данные табл. 31 и 32. Сравнивают значения скорости воздуха, полученные в результате применения раз-

личных анемометров. Делают вывод о точности приборов. Сравнивают затраты времени и трудоемкость изученных методов измерения скорости воздуха. Оценивают равномерность расхода воздуха через разные насадки.

3.7.2. По данным табл. 33 анализируют характер зависимости кратности эжекции от скорости истечения воздуха из насадки. Делают вывод о наиболее предпочтительной скорости воздуха.

#### **4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Что относится к циркуляционному оборудованию лесосушильных камер?
2. Что такое вентиляторы? Какие бывают классы вентиляторов?
3. Как устроен осевой вентилятор?
4. Каковы устройство и принцип действия центробежного вентилятора?
5. Какие типы вентиляторов применяются в лесосушильных камерах? Что такое номер вентилятора?
6. Какими параметрами характеризуется работа вентиляторов? Что такое характеристика вентилятора?
7. Что называется вентиляторной установкой?
8. Каковы различия замкнутой и незамкнутой систем воздуховодов вентиляторной установки?
9. Как определить давление, развиваемое вентилятором? Что такое динамический напор воздуха?
10. Как рассчитать потери давления на отдельных участках воздуховодов?
11. Что такое «нормальный воздух», характеристический напор? Как рассчитать величину характеристического напора?
12. В чем состоит принцип действия эжектора?
13. Как определить кратность эжекции?

## **ПРОПИТКА ДРЕВЕСИНЫ СПОСОБОМ ПРОГРЕВ – ХОЛОДНАЯ ВАННА**

*Цель работы:* приобретение навыков приготовления защитных составов и проведения защитной обработки древесины.

### **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Пропитка – это введение в древесину веществ, придающих ей специальные, ранее отсутствовавшие свойства. Пропитка может решать следующие технологические задачи:

1) повышение биостойкости древесины, т. е. ее стойкости к поражению микроорганизмами, грибами, насекомыми. Эту задачу решают путем введения в древесину специальных защитных веществ – *антисептиков*;

2) огнезащита – предохранение древесины от разрушения огнем. Повышение огнестойкости древесины и древесных материалов достигается путем использования специальных веществ – *антипиренов*;

3) улучшение физических и (или) механических свойств древесины, придание ей новых качеств, необходимых для определенного практического использования.

Пропитка древесины становится возможной благодаря тому, что жидкие пропиточные составы способны перемещаться внутри древесины. Это перемещение является следствием трех физических явлений: перемещения жидкости в древесине под действием капиллярных сил; перемещения жидкостей под действием внешнего избыточного давления; диффузионного перемещения молекул или ионов пропитывающих веществ по полостям клеток и капиллярам, заполненным водой. Соответственно с этим все известные способы пропитки древесины условно разделяют на три группы: способы капиллярной, диффузионной пропитки и пропитки под давлением (ГОСТ 200226–93).

Наиболее быстрое и глубокое проникновение защитных составов в древесину обеспечивают способы пропитки под давлением. Избыточное давление пропитывающей жидкости по отношению к давлению внутри древесины можно создать тремя различными методами:

1) методом подачи пропитывающей жидкости под давлением с одного торца сортимента (пропитка в центробежном поле);

2) автоклавным методом;

3) методом пропитки предварительно нагретой древесины.

Реализация первых двух методов возможна лишь при наличии сложного и дорогостоящего оборудования – центрифуг и автоклавов. Пропитка же в ваннах с предварительным нагревом древесины отличается простотой технологического процесса. Древесину первоначально нагревают каким-либо способом, а затем помещают в ванну с холодной пропитывающей жидкостью, где и происходит собственно пропитка. При нагревании в поровом пространстве древесины возрастает давление паровоздушной смеси за счет температурного расширения, а также за счет увеличения парциального давления паров воды. Вследствие газопроницаемости древесины большая часть избыточной паровоздушной смеси удаляется, и в древесине через некоторое время устанавливается давление, близкое к атмосферному. При этом основную его долю составляет парциальное давление водяного пара. После погружения в холодную ванну древесина охлаждается. Давление в полостях клеток снижается как в результате собственно температурного эффекта, так и за счет конденсации водяного пара. Давление жидкости в ванне, равное атмосферному, становится избыточным по отношению к древесине. В результате между поверхностными и внутренними слоями древесины возникает градиент давления. Величина его определяется выражением

$$\Delta p = p_0 - p_{п2} - \frac{(p_0 - p_{п1}) \cdot T_2}{T_1}, \quad (75)$$

где  $p_0$  – атмосферное давление, Па;  $p_{п2}$  и  $p_{п1}$  – парциальное давление водяного пара в полостях клеток охлажденной и нагретой древесины, Па;  $T_2$  и  $T_1$  – абсолютная температура охлажденной и нагретой древесины, К.

Анализируя уравнение (75), можно сделать вывод, что перепад давления  $\Delta p$ , а следовательно, и эффективность проникнове-

ния пропитывающей жидкости в древесину можно увеличить двумя способами: увеличивая температуру нагретой древесины и уменьшая температуру охлажденной древесины. Однако в любом случае при пропитке в ваннах с предварительным нагревом перепад давлений  $\Delta p$  не может быть выше атмосферного давления  $p_0$ .

ГОСТ 20022.6 устанавливает три варианта пропитки способом прогрев – холодная ванна:

1) прогрев и пропитка осуществляются в одной ванне с остыванием древесины в горячем растворе защитного средства до полного его остывания;

2) прогрев и пропитка осуществляются в двух ваннах с переносом пропитываемой древесины из одной ванны в другую;

3) прогрев и пропитка осуществляются в одной ванне с заменой горячего раствора защитного средства холодным без обнажения обрабатываемой древесины во время замены.

Первый из перечисленных способов имел в свое время значительное распространение в Западной Европе. Его использовали фермеры для пропитки столбов, деталей ограждений и мостов креозотом. Сущность способа заключается в следующем. Днем пропиточную жидкость с погруженной в нее древесиной нагревали, а ночью она остывала. Достоинствами такой технологии с суточным циклом работы являются простота, минимальные затраты труда и энергии. Однако применима она лишь при небольших объемах пропитки.

Второй вариант более производительен и получил большее распространение. Сущность его заключается в использовании двух ванн: горячей и холодной. Пакет пропитываемых сортиментов или деталей помещают в ванну с горячей пропитывающей жидкостью, где происходит разогрев древесины. Затем пакет быстро погружают в ванну с холодной жидкостью, при выдержке в которой и происходит собственно пропитка. Недостаток рассматриваемого варианта – контакт нагретой древесины с воздухом во время перегрузки. При этом происходит попадание в открытые полости клеток воздушных пузырьков, которые впоследствии замедляют проникновение защитного состава в глубь древесины.

Указанного недостатка лишен третий вариант с использованием одной горяче-холодной ванны. Последовательность техно-

логических операций в этом случае следующая. Пакет сортиментов загружают в ванну, заполненную горячим пропиточным составом. После завершения прогрева древесины горячую жидкость быстро заменяют холодной путем перекачки насосами. При этом не допускают контакта пропитываемой древесины с воздухом. Сортименты, таким образом, на протяжении всей операции остаются погруженными в защитный состав. Попадание пузырьков воздуха в капилляры древесины исключается.

Сортименты и детали, поступающие на пропитку, должны быть окорены с полным удалением луба. Предпропиточная влажность древесины при пропитке маслами или защитными средствами, растворимыми в органических растворителях, не должна превышать 25%, а при пропитке водорастворимыми защитными средствами – 30%. При обработке труднопропитываемых пород древесины возможно проведение подготовительной операции – *накалывания*.

Сортименты и детали укладывают в пакеты таким образом, чтобы защитное средство имело свободный доступ ко всем поверхностям пропитываемой древесины. Укладку поэтому рекомендуется выполнять с прокладками. Уровень пропиточной жидкости в ваннах во время пропитки должен быть на 80–100 мм выше верхнего слоя пропитываемого материала. Ванны должны быть оснащены противовсплывным устройством.

При пропитке древесины водорастворимыми защитными средствами температура пропиточного раствора в горячей ванне должна быть 90–95°C, в холодной – 20–40°C. Если в качестве пропиточного состава используется масло или защитное средство, растворимое в органических растворителях, то рекомендуемая температура в ваннах несколько другая: в горячей – 95–110°C, в холодной – 40–50°C.

Время выдержки материала в нагретом растворе зависит от его толщины и желаемой глубины пропитки. Оно может составлять от 30 мин до нескольких часов. При выборе оптимальной продолжительности прогрева следует учитывать, что он необходим для удаления паровоздушной смеси из древесины. В зависимости от заданной глубины пропитки прогрев может распространиться на все сечение сортимента или на определенную по глубине зону. Чем больше глубина прогрева, тем

в большей степени эвакуируется воздух, возникает меньшее сопротивление движению пропиточной жидкости, глубже получается пропитка. Время выдержки древесины в холодном пропиточном растворе должно быть не меньше, чем в горячем. Продолжительность периода охлаждения должна быть определена по возможности точно, так как именно в это время и происходит процесс пропитки. Охлаждение так же, как и прогрев, может охватывать всю толщину сортифта или его определенную зону в зависимости от заданной глубины пропитки. Таким образом, продолжительности прогрева и охлаждения должны быть увязаны между собой.

Способ прогрев – холодная ванна может обеспечить при пропитке толстых сортифтов из заболонной древесины глубину проникновения защитного состава в пределах 1–5 мм, при пропитке досок – до 5 мм. Если пропитывается ядровая древесина или древесина труднопропитываемых пород, то глубина пропитки обычно составляет около 2 мм.

## **2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

---

### **2.1. Материалы, приборы, инструменты:**

- раствор антисептического препарата или его концентрат с известной концентрацией;
- образцы древесины в виде брусков с поперечным сечением 20×20 мм и длиной вдоль волокон 100 мм (допускается 30 мм при использовании слабопроникающих антисептических препаратов);
- бумага фильтровальная;
- установка для пропитки древесины;
- весы аналитические (точность определения массы – 0,01 г);
- набор ареометров;
- мерный цилиндр вместимостью 250 мл;
- воронка;
- штангенциркуль;
- термометр с диапазоном измерений до 150°C;
- секундомер;
- лупа с увеличением 8× и оптическим измерительным устройством.

## **2.2. Определение концентрации раствора антисептического препарата.**

2.2.1. Испытуемый раствор переливают в чистый сухой мерный цилиндр так, чтобы уровень жидкости не доходил до верхнего края на 3–4 см. Температура раствора должна быть  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ .

2.2.2. Выбирают из набора ареометр, на шкале которого предусмотрена ожидаемая величина плотности. Ареометр осторожно опускают в мерный цилиндр, не выпуская из рук до тех пор, пока он не станет плавать, не касаясь стенок и дна цилиндра.

2.2.3. Отсчет плотности раствора производят через 2–3 мин после погружения по делению на шкале ареометра, соответствующему нижнему краю мениска жидкости.

2.2.4. По таблице приложения 15 определяют концентрацию испытуемого раствора. При необходимости применяют метод интерполяции.

## **2.3. Подготовка образцов.**

2.3.1. Для проведения испытания берут десять образцов древесины размером  $20 \times 20 \times 100$  мм (по указанию преподавателя допустимо использовать образцы укороченной длины вплоть до  $20 \times 20 \times 30$  мм).

2.3.2. Образцы маркируют и взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,01 г. С помощью штангенциркуля определяют их геометрические размеры с точностью до 0,1 мм. Результаты взвешиваний и измерений записывают в табл. 34.

## **2.4. Лабораторная установка.**

Схема установки для пропитки древесины способом прогрев – холодная ванна изображена на рис. 34. В ее состав входят две емкости, одна из которых (1) предназначена для горячего пропитывающего раствора, другая (8) – для холодного. Требуемую температуру в емкости (1) поддерживают с помощью электроплитки (2) и регулятора температуры (3). При использовании водорастворимых растворов в качестве горячей ванны можно при менять водяной термостат, принцип работы которого описан в лабораторной работе № 5.

Для погружения образцов древесины 6 в пропитывающий раствор используют штатив 4. Образцы в нем располагают вертикально между двумя сетками 5 на некотором расстоянии друг от друга.

Для погружения образцов древесины 6 в пропитывающий раствор используют штатив 4. Образцы в нем располагают вертикально между двумя сетками 5 на некотором расстоянии друг от друга.



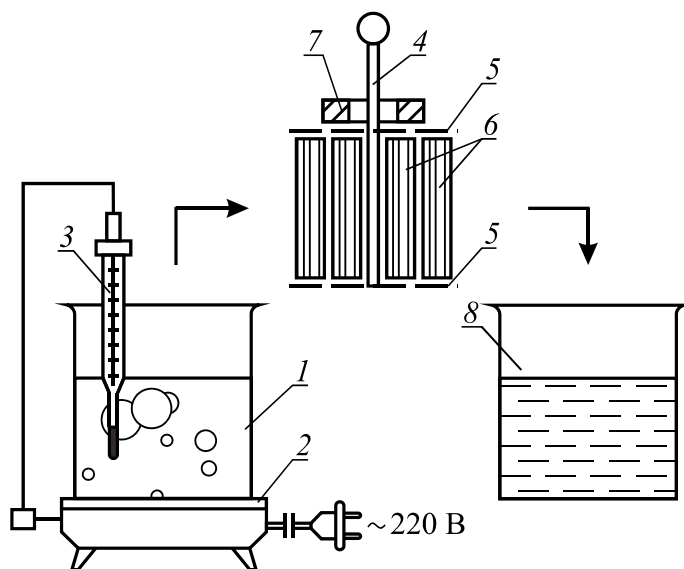


Рис. 34. Лабораторная установка для пропитки древесины способом прогрев – холодная ванна:

- 1 – емкость с горячим пропиточным раствором;  
2 – электроплитка или другой нагреватель; 3 – регулятор температуры;  
4 – штатив; 5 – сетки; 6 – образцы древесины; 7 – противовсплывной груз;  
8 – емкость с холодным пропиточным раствором

## 2.5. Пропитка древесины.

2.5.1. Включают электроплитку 2 в сеть и нагревают пропиточный раствор в емкости 1 до температуры 90–95°C (препараты ПББ и ПБС) или до температуры 40–50°C (препарат ХМ-11). С помощью регулятора 3 поддерживают эту температуру раствора на протяжении всего опыта.

2.5.2. Подготовленные образцы древесины вставляют в штатив 4 гидроизолированными торцами вверх. Сверху на сетку 5 укладывают противовсплывной груз 7.

2.5.3. Штатив с образцами древесины погружают в горячий пропиточный раствор, находящийся в емкости 1. Одновременно включают секундомер. Выдерживают древесину в горячем растворе защитного средства 45 мин или по заданию преподавателя, которое для каждой породы древесины указывается в табл. 35.

2.5.4. Измеряют температуру пропиточного раствора в емкости 8. Она должна быть в пределах 20–40°C.

2.5.5. Штатив с образцами древесины быстро извлекают из емкости 1 и погружают в холодный пропиточный раствор, находящийся в емкости 8. Выполнив эту операцию, включают секундомер.

Продолжительность выдержки образцов древесины в емкости с холодным раствором – 45 мин или по заданию преподавателя, которое для каждой породы древесины указывается в табл. 35.

Таблица 35

**Режим пропитки древесины \_\_\_\_\_**

| Стадия режима пропитки | Продолжительность выдержки древесины $\tau$ , мин |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|------------------------|---------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|                        | Номер образца                                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|                        | 1                                                 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| В горячей ванне        |                                                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| В холодной ванне       |                                                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

2.5.6. По истечении времени пропитки штатив достают из емкости и извлекают из него образцы древесины. Поверхность образцов осушают фильтровальной бумагой, после чего их взвешивают с точностью до 0,01 г. Результаты определения массы записывают в табл. 34.

2.5.7. Рассчитывают поглощение защитного средства по формулам

$$G = \frac{m_2 - m_1}{V} \cdot 10^3; \quad (76)$$

$$G_c = \frac{10 \cdot (m_2 - m_1) \cdot C}{V}, \quad (77)$$

где  $G$  – поглощение раствора защитного средства, кг/м<sup>3</sup>;  $G_c$  – поглощение сухих веществ защитного средства, кг/м<sup>3</sup>;  $m_1$ ,  $m_2$  – масса образца до и после пропитки, г;  $V$  – объем образца, см<sup>3</sup>;  $C$  – концентрация раствора защитного средства, %.

2.5.8. Рассчитывают удержание защитного средства по формуле

$$U = \frac{100 \cdot (m_2 - m_1) \cdot C}{S}, \quad (78)$$

где  $U$  – удержание защитного средства, г/м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь поверхности образца, см<sup>2</sup>.

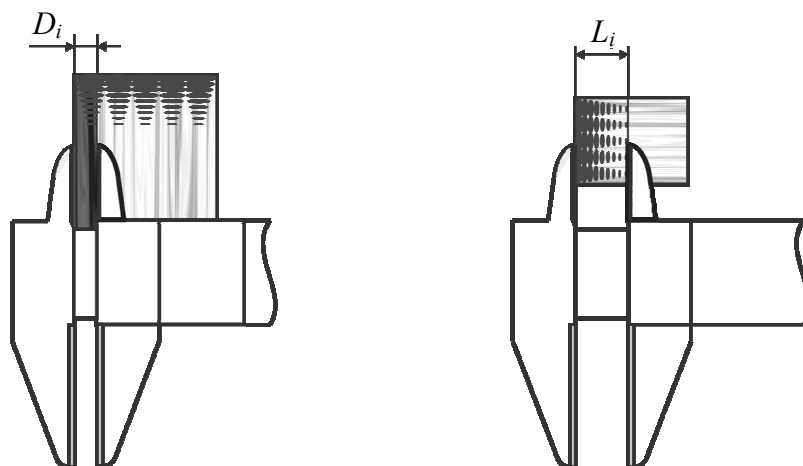
2.5.9. Результаты расчетов заносят в табл. 34.

## **2.6. Определение проникаемости защитного средства в древесину.**

2.6.1. Пропитанные образцы древесины раскалывают вдоль волокон в двух перпендикулярных друг к другу и боковым поверхностям направлениях, как это показано на рис. 35, а.



а



б

Рис. 35. Схема раскалывания образцов древесины (а) и измерения глубины пропитки штангенциркулем (б)

2.6.2. На поверхности раскола кисточкой наносят индикатор, который окрашивает пропитанные участки древесины в красный цвет. В случае когда пропиточный состав хорошо окрашивает древесину в контрастный цвет, индикаторный раствор не применяют. При этом получается картина, показанная на рис. 35, б.

2.6.3. Глубину проникновения пропиточного раствора измеряют, используя лупу с оптическим измерительным устройством или при более глубоком проникновении (более 1,5 мм) штангенциркуль. Для определения глубины проникновения защитного средства вдоль волокон производят по два измерения (с каждого торца) на каждой поверхности раскола и за глубину проникновения принимают среднее арифметическое четырех измерений ( $L_1-L_4$ ). Для определения глубины проникновения поперек волокон производят по одному измерению на каждой поверхности раскола на середине длины образца ( $D_1-D_4$ ). За глубину проникновения принимают среднее арифметическое восьми измерений. Проницаемость защитного средства – среднее арифметическое значений глубины проникновения, полученных для трех образцов. Результаты определения глубины проникновения пропиточного раствора в древесину обобщают в табл. 34.

### 2.7. Анализ опытных данных.

Анализируют данные табл. 34. Сравнивают значения поглощения и удержания защитного средства, полученные для разных пород древесины, для различных образцов одной и той же породы. Аналогичный анализ делают для проницаемости (глубины проникновения) защитного средства.

## 3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Что такое пропитка? Какие технологические задачи она решает?
2. Что такое антипирены, антисептики? С какой целью их вводят в древесину?
3. Благодаря чему пропиточные составы могут проникать в древесину?
4. Какие существуют способы пропитки древесины?
5. Какие существуют варианты способа пропитки под давлением?
6. В чем состоит суть способа пропитки в ваннах с предварительным нагревом древесины?

7. Почему способ пропитки прогрев – холодная ванна относится к способам пропитки под давлением? Каким образом в древесине возникает градиент давления?

8. Как можно повысить эффективность пропитки по способу прогрев – холодная ванна?

9. Какие существуют варианты способа пропитки прогрев – холодная ванна?

10. Почему вариант способа прогрев – холодная ванна с использованием одной ванны лучше, чем с использованием двух ванн (горячей и холодной)?

11. В чем состоит подготовка древесины к пропитке? Как следует укладывать сортименты в ванну?

12. Каков температурный режим пропитки древесины по способу прогрев – холодная ванна?

13. Какова продолжительность выдержки древесины в холодной и горячей ваннах?

14. Какие параметры используются для оценки поглощения древесиной защитных средств?

15. Как рассчитать поглощение раствора защитного средства и его сухих веществ?

16. Что такое удержание защитного средства? Как определяют этот параметр?

17. Как оценивают проникаемость защитного средства в древесину?

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

Базисная плотность древесины

| Порода | Базисная плотность, кг/м <sup>3</sup> | Порода       | Базисная плотность, кг/м <sup>3</sup> |
|--------|---------------------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Береза | 500                                   | Лиственница  | 520                                   |
| Бук    | 530                                   | Ольха        | 420                                   |
| Граб   | 630                                   | Осина        | 400                                   |
| Дуб    | 560                                   | Орех грецкий | 470                                   |
| Ель    | 360                                   | Пихта        | 300                                   |
| Кедр   | 350                                   | Сосна        | 400                                   |
| Клен   | 550                                   | Тополь       | 360                                   |
| Липа   | 400                                   | Ясень        | 550                                   |

## Приложение 2

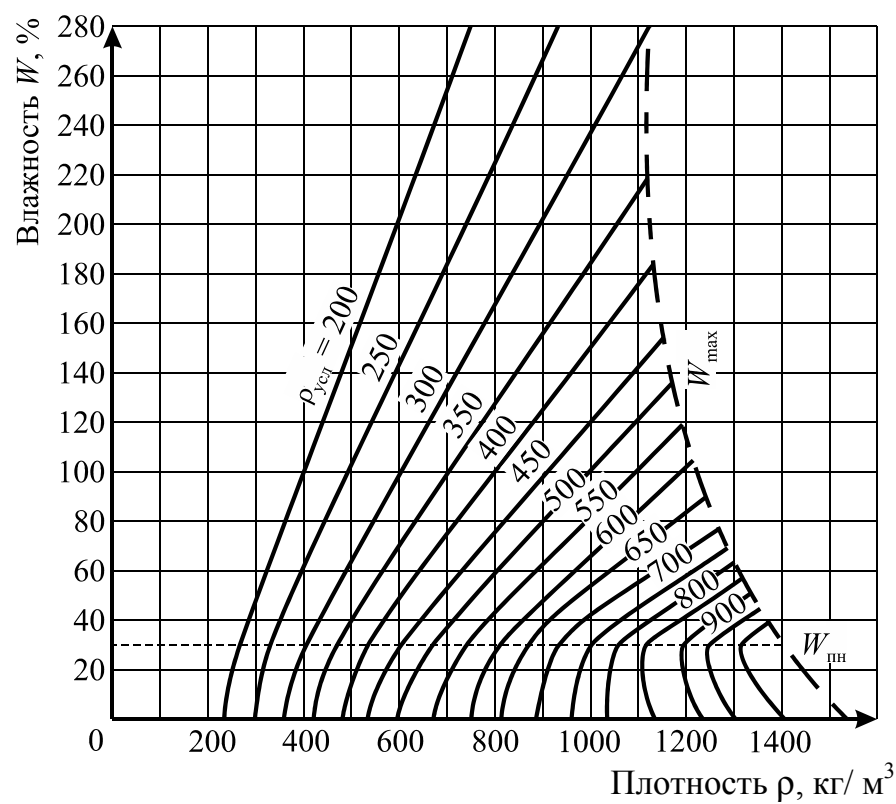


Диаграмма для определения плотности древесины

## Приложение 3

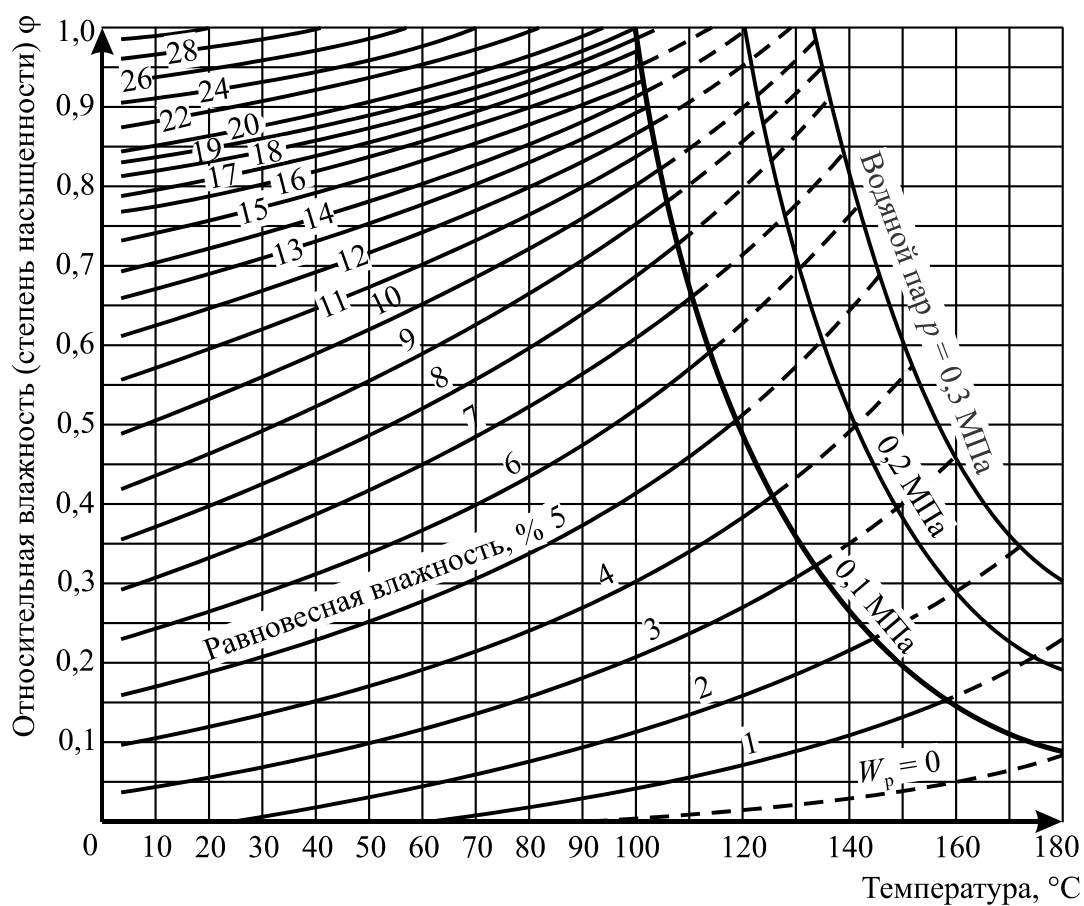


Диаграмма для определения равновесной влажности древесины

## Приложение 4

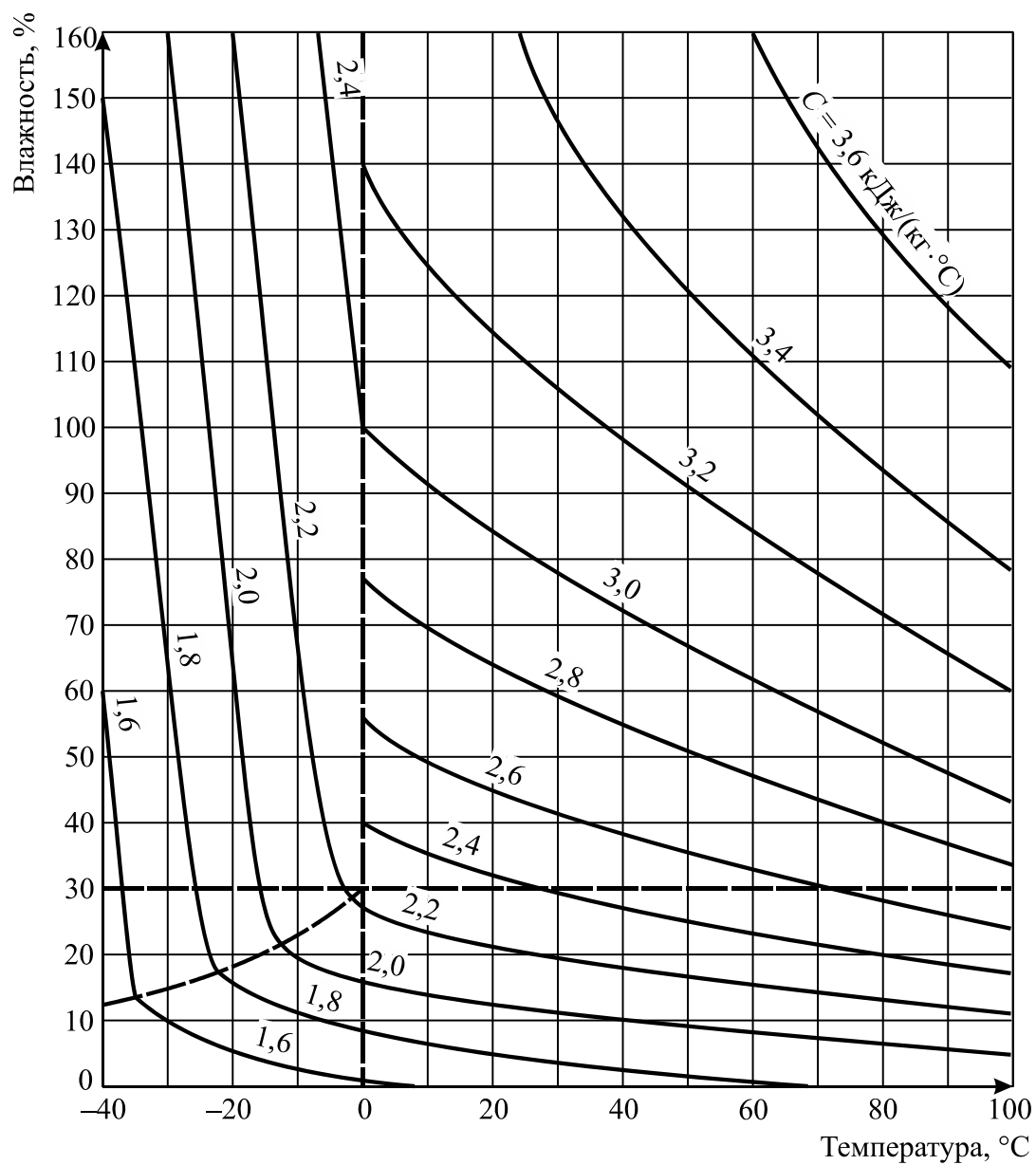


Диаграмма для определения удельной теплоемкости древесины

## Приложение 5

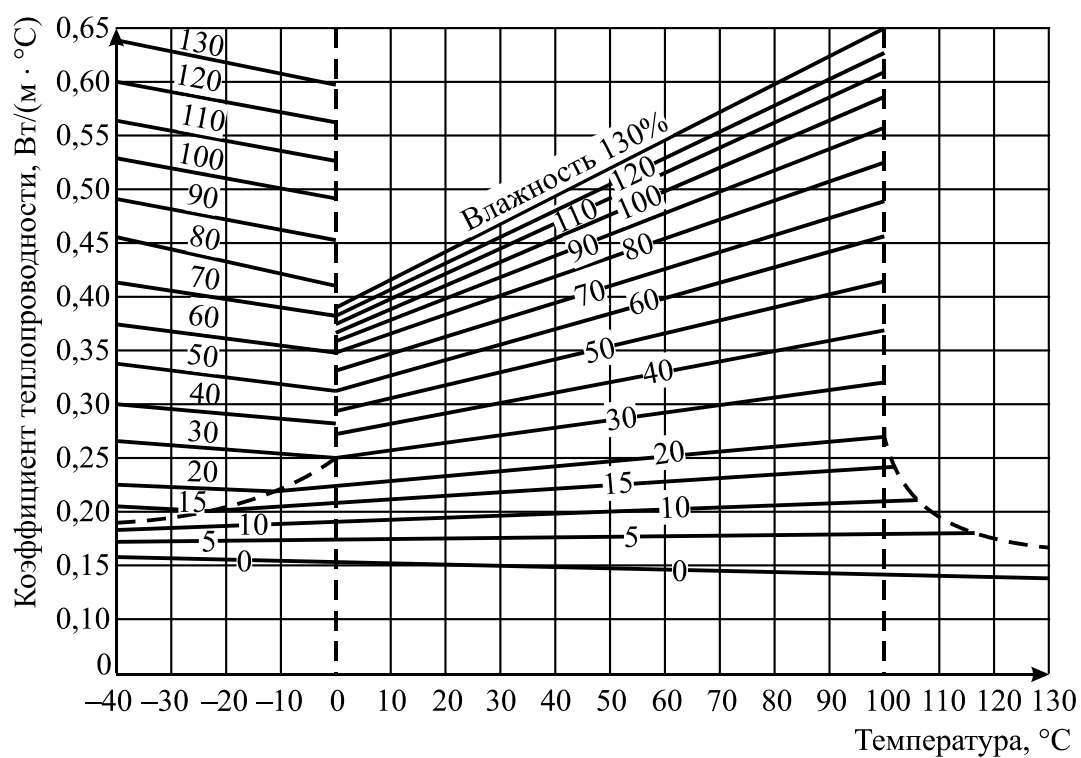


Диаграмма для определения коэффициента теплопроводности  
древесины березы поперек волокон ( $\lambda_n$ )

## Приложение 6

Таблица П1

**Значение коэффициента  $k_p$ , учитывающего влияние базисной плотности на теплопроводность древесины**

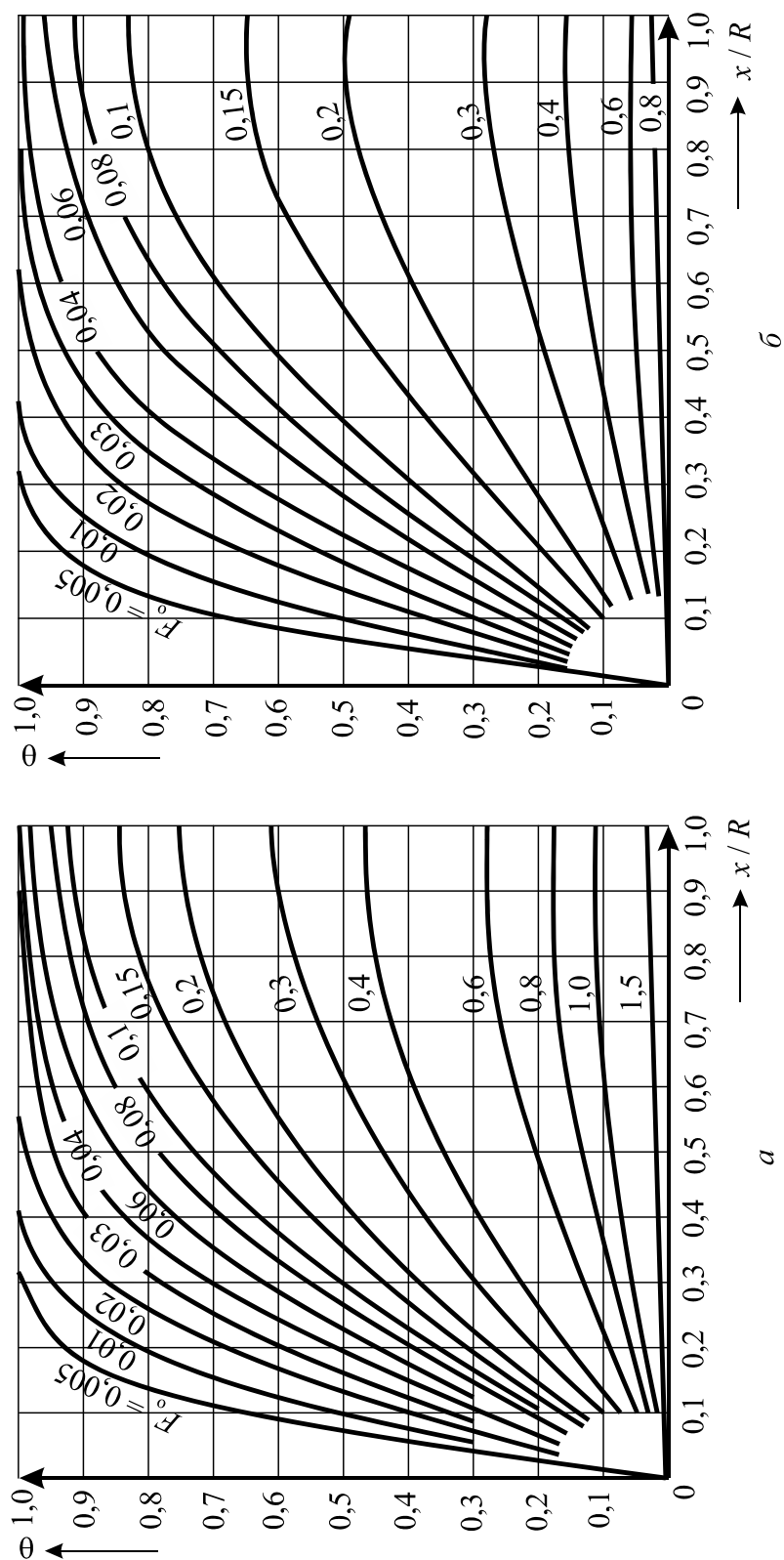
| Базисная плотность, кг/м <sup>3</sup> | 350  | 400  | 450  | 500  | 550  | 600  | 650  |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Значение $k_p$                        | 0,81 | 0,87 | 0,93 | 1,00 | 1,11 | 1,26 | 1,45 |

Таблица П2

**Значения коэффициента  $k_x$ , учитывающего направление теплового потока на теплопроводность древесины**

| Группа пород древесины                                       | Коэффициент $k_x$ теплового потока при направлении |                |               |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------|---------------|
|                                                              | радиальном                                         | тангенциальном | вдоль волокон |
| Хвойные                                                      | 1,00                                               | 1,00           | 2,20          |
| Лиственные с развитыми сердцевинными лучами (дуб, бук, клен) | 1,00                                               | 0,87           | 1,60          |
| Лиственные с неразвитыми сердцевинными лучами (остальные)    | 1,00                                               | 1,00           | 2,00          |

Приложение 7



Номограмма для определения критерия Фурье  $F_0$   
по значениям безразмерной координаты  $x/R$  и безразмерной температуры  $\Theta$ :  
 $a$  — неограниченная пластина;  $b$  — неограниченный цилиндр

## Приложение 8

Таблица П1

**Исходная продолжительность  
начального прогрева пиломатериалов ( $\tau_{исх}$ )**

| Толщина<br>пиломатериалов, мм | $\tau_{исх}$ , ч, при скорости циркуляции, м/с |     |     |     |     |
|-------------------------------|------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                               | 1,0                                            | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| 16                            | 1,9                                            | 1,6 | 1,4 | 1,2 | 1,1 |
| 19                            | 2,0                                            | 1,7 | 1,5 | 1,3 | 1,2 |
| 22                            | 2,1                                            | 1,8 | 1,5 | 1,3 | 1,2 |
| 25                            | 2,2                                            | 1,9 | 1,6 | 1,4 | 1,3 |
| 32                            | 2,6                                            | 2,2 | 1,9 | 1,7 | 1,6 |
| 40                            | 3,7                                            | 3,0 | 2,6 | 2,3 | 2,1 |
| 50                            | 4,8                                            | 3,9 | 3,2 | 2,9 | 2,7 |

Таблица П2

**Значение коэффициента  $A_T$ , учитывающего  
начальную температуру древесины**

| Начальная<br>температура<br>древесины, °C | Коэффициент $A_T$ при температуре среды, °C |       |      |      |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------|-------|------|------|
|                                           | 60                                          | 70–80 | 90   | 100  |
| Ниже –20                                  | 1,05                                        | 1,10  | 1,15 | 1,20 |
| –20...0                                   | 0,95                                        | 1,00  | 1,05 | 1,10 |
| Выше 0                                    | 0,75                                        | 0,85  | 0,95 | 1,00 |

Таблица П3

**Значение коэффициента  $A_B$ , учитывающего  
начальную влажность древесины**

| Начальная<br>температура<br>древесины, °C | Коэффициент $A_B$<br>при начальной влажности древесины, % |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                                           | 30                                                        | 40   | 60   | 80   | 100  | 120  | 140  |
| Ниже 0                                    | 0,84                                                      | 0,87 | 1,02 | 1,10 | 1,30 | 1,38 | 1,45 |
| Выше 0                                    | 0,90                                                      | 0,94 | 1,00 | 1,08 | 1,15 | 1,22 | 1,28 |

## Приложение 9

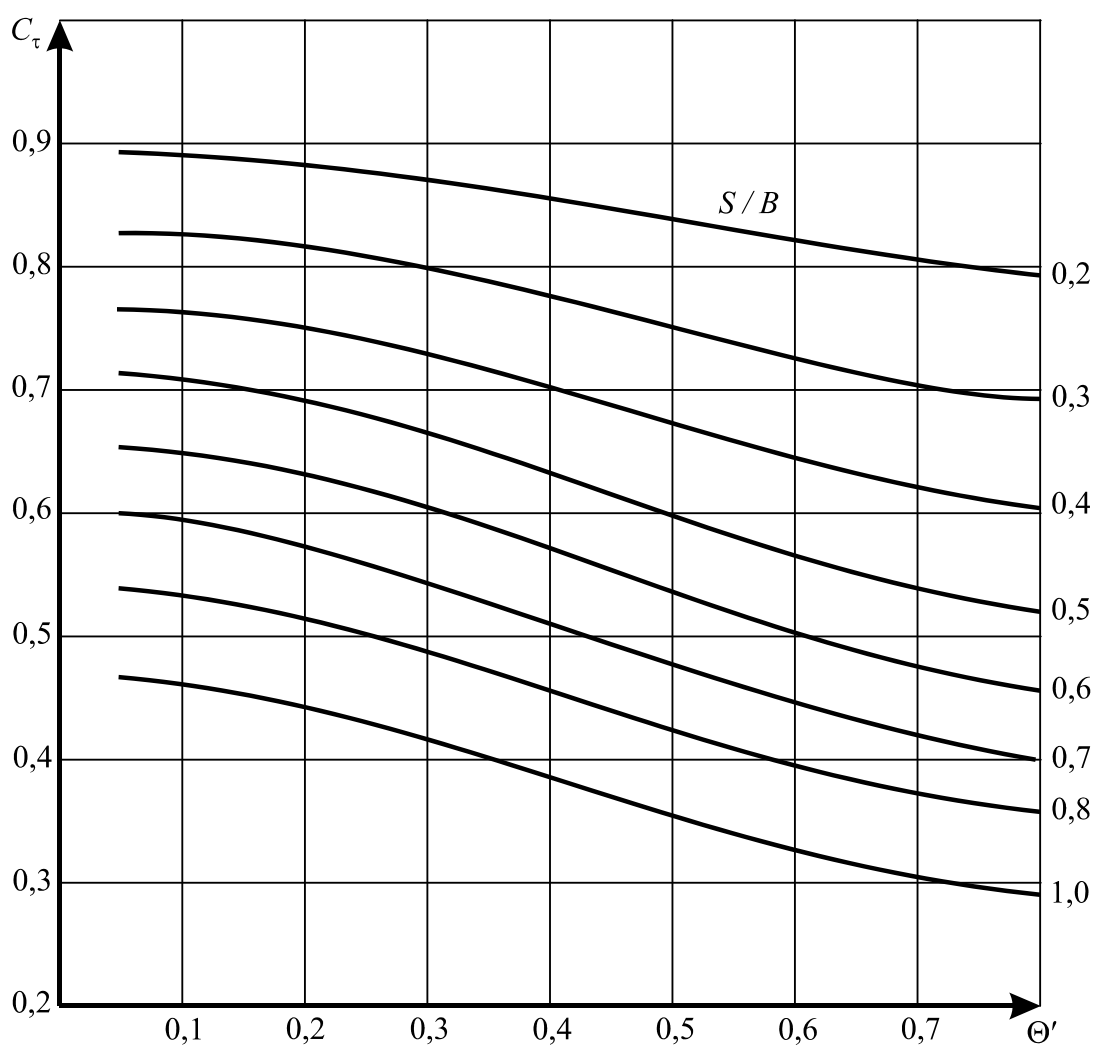


Диаграмма для определения поправочного коэффициента  $C_\tau$ :  
 $S, B$  – толщина и ширина сортифта, мм;  $\Theta'$  – безразмерная влажность

## Приложение 10

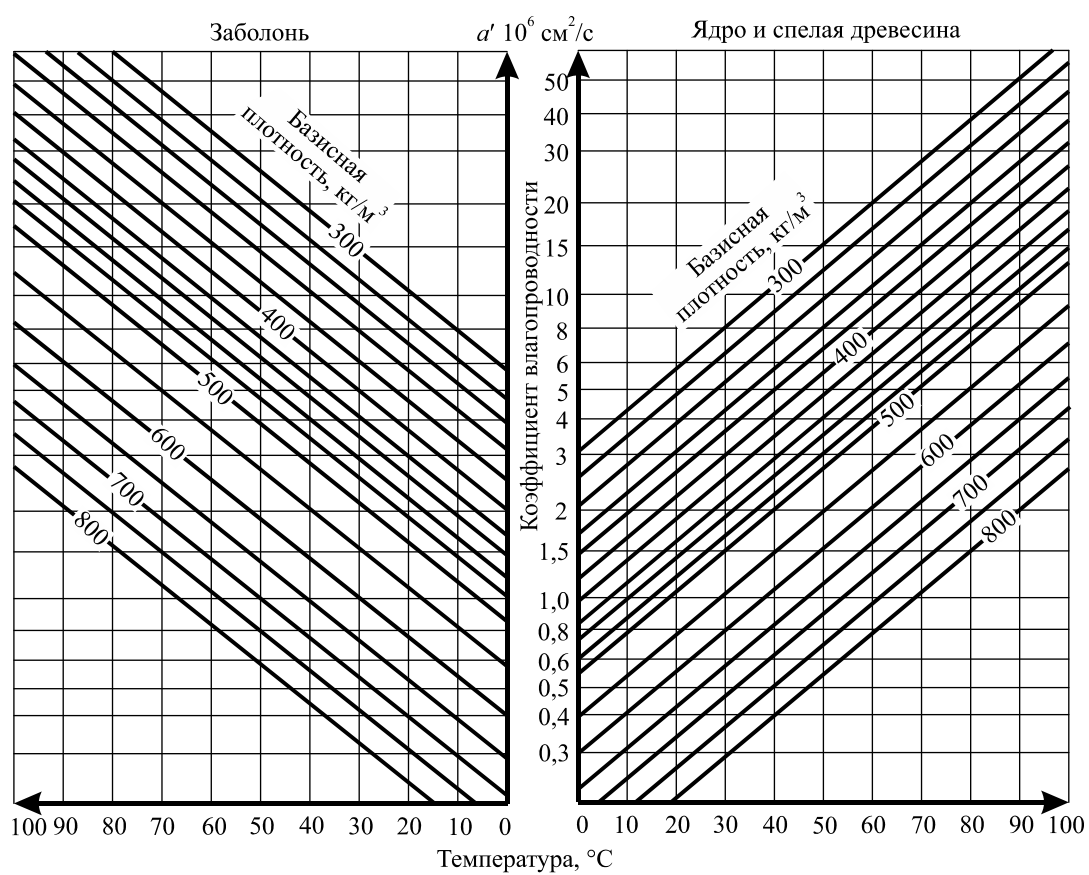


Диаграмма для определения коэффициента  
влагопроводности в тангенциальном направлении

Приложение 11

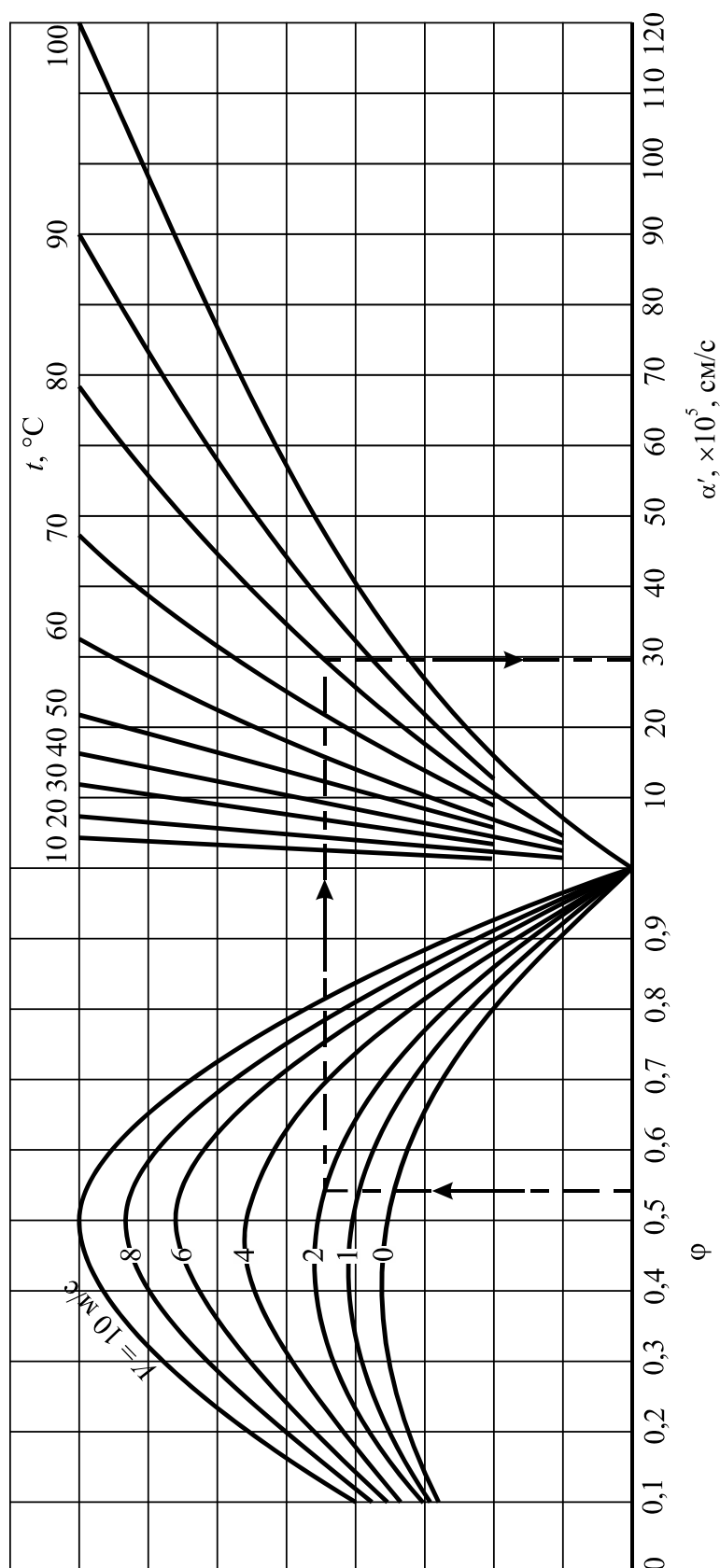


Диаграмма для определения коэффициента влагообмена  $\alpha'$ :

$\phi$  – степень насыщенности (относительная влажность) воздуха;

$V$  – скорость движения воздуха, м/с;  $t$  – температура воздуха, °C

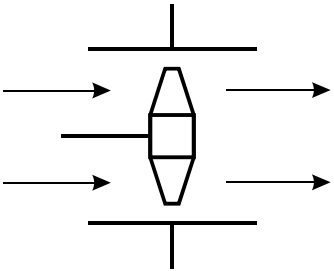
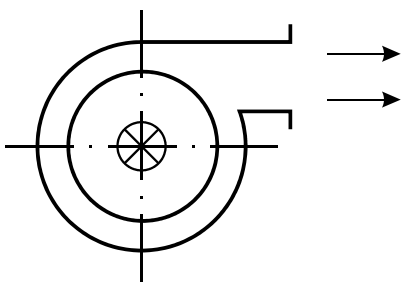
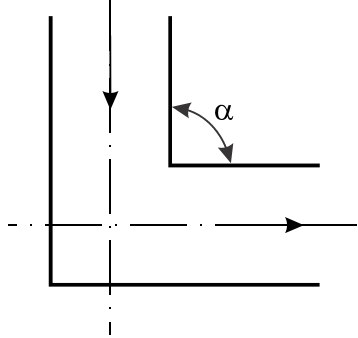
### Приложение 12

Значения параметра  $B$ , необходимого для расчета продолжительности сушки неограниченной пластины

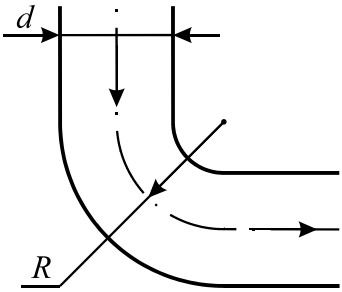
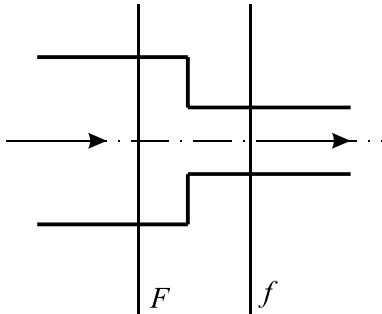
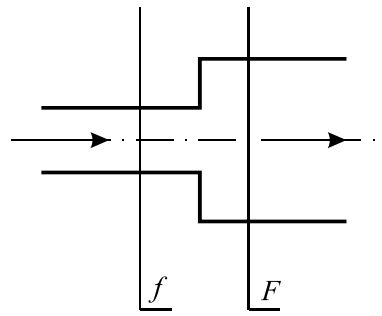
|       |      |      |      |      |      |      |      |      |          |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $B_i$ | 1    | 2    | 4    | 8    | 12   | 20   | 30   | 50   | $\infty$ |
| $B$   | 0,99 | 0,96 | 0,93 | 0,89 | 0,87 | 0,85 | 0,84 | 0,83 | 0,81     |

### Приложение 13

Значения коэффициентов местных сопротивлений

| Эскиз                                                                               | Наименование местного сопротивления                                                           | Коэффициент местного сопротивления |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
|   | Осевой вентилятор                                                                             | 0,80                               |
|  | Центробежный вентилятор                                                                       | 0,30                               |
|  | Поворот потока без закругления (колена) под углом $\alpha$ , град:<br>90<br>120<br>135<br>150 | 1,10<br>0,55<br>0,25<br>0,20       |

## Окончание прил. 13

| Эскиз                                                                               | Наименование<br>местного<br>сопротивления                                                                                                 | Коэффициент<br>местного<br>сопротивления                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|    | Поворот потока с за-<br>круглением для круглой<br>или квадратной трубы<br>при отношении $R / d$ :<br>0,75<br>1,00<br>1,25<br>1,50<br>2,00 | 0,50<br>0,25<br>0,20<br>0,18<br>0,15                                         |
|   | Внезапное сужение по-<br>тока при отношении<br>площадей $f / F$ :<br>0,1<br>0,3<br>0,5<br>0,6<br>0,7<br>0,8<br>0,9                        | 0,29<br>0,25<br>0,18<br>0,13<br>0,08<br>0,04<br>0,01                         |
|  | Внезапное расширение<br>потока при отношении<br>площадей $f / F$ :<br>0,0<br>0,1<br>0,2<br>0,3<br>0,4<br>0,5<br>0,6<br>0,7<br>0,8<br>0,9  | 1,00<br>0,81<br>0,64<br>0,48<br>0,36<br>0,25<br>0,16<br>0,10<br>0,05<br>0,01 |

**Приложение 14****Давление насыщенного водяного пара  
в зависимости от температуры**

| Температура, °С | Давление, Па | Температура, °С | Давление, Па | Температура, °С | Давление, Па |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 0               | 327,84       | 14              | 1598,53      | 28              | 3779,68      |
| 2               | 705,27       | 16              | 1817,18      | 30              | 4242,31      |
| 4               | 813,26       | 18              | 2063,82      | 32              | 4754,55      |
| 6               | 934,59       | 20              | 2338,47      | 34              | 5319,55      |
| 8               | 103,24       | 22              | 2643,77      | 36              | 5940,83      |
| 10              | 1227,89      | 24              | 2983,75      | 38              | 6619,44      |
| 12              | 1402,55      | 26              | 3361,05      | 40              | 7375,37      |

**Приложение 15****Зависимость плотности растворов защитных средств от концентрации**

| Концентрация раствора защитного средства, % | Плотность раствора, г/см <sup>3</sup> , для препаратов |         |       | Концентрация раствора защитного средства, % | Плотность раствора, г/см <sup>3</sup> , для препаратов |         |       |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------|-------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------|-------|
|                                             | ПББ-155                                                | ПБС-155 | ХМ-11 |                                             | ПББ-155                                                | ПБС-155 | ХМ-11 |
| 1                                           | –                                                      | –       | 1,003 | 6                                           | 1,025                                                  | 1,036   | 1,031 |
| 2                                           | –                                                      | –       | 1,010 | 7                                           | 1,030                                                  | 1,042   | 1,040 |
| 3                                           | 1,012                                                  | 1,018   | 1,017 | 8                                           | 1,034                                                  | 1,048   | 1,047 |
| 4                                           | 1,016                                                  | 1,0245  | 1,023 | 9                                           | 1,038                                                  | 1,052   | 1,056 |
| 5                                           | 1,020                                                  | 1,030   | 1,027 | 10                                          | 1,042                                                  | 1,056   | 1,061 |

**Приложение 16****Относительное содержание связанной воды,  
оставшейся в замороженной древесине в жидком состоянии**

| $t$ , °С            | –50 | –40 | –30 | –25 | –20 | –15 | –10 | –5 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| $W_{\text{сж}}$ , % | 1   | 14  | 15  | 17  | 18  | 20  | 23  | 27 |

## ЛИТЕРАТУРА

1. Снопков, В. Б. Гидротермическая обработка и защита древесины. Примеры и задачи: учеб. пособие / В. Б. Снопков. – Минск: БГТУ, 2005. – 234 с.
2. Снопков, В. Б. Гидротермическая обработка и защита древесины. Лабораторный практикум / В. Б. Снопков, Л. Ф. Донченко, В. М. Сердега. – Минск: БГТУ, 2003. – 114 с.
3. Справочник по сушке древесины / Е. С. Богданов [и др.]. – М.: Лесная пром-сть, 1990. – 304 с.
4. Снопков, В. Б. Гидротермическая обработка и защита древесины. Курсовое и дипломное проектирование : учеб. пособие / В. Б. Снопков. – Минск: БГТУ, 2007. – 110 с.
5. Кречетов, И. В. Сушка и защита древесины / И. В. Кречетов. – М.: Лесная пром-сть, 1987. – 328 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Предисловие.....                                                                               | 3   |
| Лабораторная работа № 1. Определение влажности древесины...                                    | 5   |
| Лабораторная работа № 2. Исследование равновесного состояния древесины и влажного воздуха..... | 16  |
| Лабораторные работы № 3–4. Изучение тепловых свойств древесины.....                            | 22  |
| Лабораторные работы № 5–6. Нагревание древесины в воде .....                                   | 35  |
| Лабораторная работа № 7. Нагревание древесины в насыщенном паром воздухе.....                  | 49  |
| Лабораторная работа № 8. Изучение механизма сушки древесины .....                              | 59  |
| Лабораторная работа № 9. Определение показателей качества сушки древесины.....                 | 70  |
| Лабораторная работа № 10. Конвективная сушка пиломатериалов .....                              | 82  |
| Лабораторные работы № 11–12. Изучение циркуляционного оборудования .....                       | 98  |
| Лабораторная работа № 13. Пропитка древесины способом прогрева холодной ванной.....            | 114 |
| Приложения .....                                                                               | 126 |
| Литература .....                                                                               | 139 |

Учебное издание

**Снопков** Василий Борисович  
**Федосенко** Иван Гавриилович

**ГИДРОТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА  
И ЗАЩИТА ДРЕВЕСИНЫ  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Редактор *А. Д. Микитюк*  
Компьютерная верстка *О. Ю. Шантарович*  
Корректор *Т. Е. Самсанович*

Подписано в печать 08.01.2015. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 8,1. Уч.-изд. л. 8,4.  
Тираж 200 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:  
УО «Белорусский государственный технологический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/227 от 20.03.2014.  
ЛП № 02330/12 от 30.12.2013.  
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.