



В.И. Крюк, Е.Е. Швамм

**ФИЗИКА**  
**В ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИИ И**  
**ТЕХНОЛОГИИ ДРЕВЕСИНЫ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.И. Крюк, Е.Е. Швамм

# **ФИЗИКА В ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИИ И ТЕХНОЛОГИИ ДРЕВЕСИНЫ**

Лекции

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области лесного дела по дисциплине "Древесиноведение. Лесное товароведение" для студентов вузов, обучающихся по направлению 250300 "Технология и оборудование лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств"

Екатеринбург

2007

УДК 630\*81.001.5(075.8)

Рецензенты:

Кафедра экспериментальной физики УГТУ-УПИ

Директор федерального государственного унитарного предприятия «Уральский научно-исследовательский институт переработки древесины» (УралНИИДрев), канд. техн. наук, доцент А.Г. Гороховский

Крюк В.И., Швамм Е.Е. Физика в древесиноведении и технологии древесины: Лекции. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2007. - 80 с.

ISBN 978-5-94984-140-2

Излагается ряд положений курса общей физики (разделы «Механика», «Молекулярная физика», «Электромагнетизм», «Оптика», «Атомная и ядерная физика») и приводятся примеры их использования в древесиноведении и технологии древесины (свойства древесины, контроль качества и дефектоскопия древесины, гидротермическая обработка и консервирование древесины).

Предназначено для специалистов и студентов специальностей 250403, 250201, направлений 250300 «Технология и оборудование лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств», 250100 «Лесное дело».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Уральского государственного лесотехнического университета.

ISBN 978-5-94984-140-2

© Уральский государственный  
лесотехнический университет, 2007  
© Крюк В.И., Швамм Е.Е., 2007

## ВВЕДЕНИЕ

Физика является фундаментальной наукой, задача которой в техническом вузе общеизвестна и понятна – формирование теоретической базы подготовки будущего инженера, без которой невозможна его успешная деятельность.

Вместе с тем у преподавателей специальных дисциплин возникает естественное стремление «прикладного ориентирования» курса физики, т. е. более тесной привязки общих физических законов и задач непосредственно к конкретной специальности (отчасти это находит отражение в рекомендуемых учебных программах).

Что касается цикла дисциплин, посвященных изучению древесины и технологии ее обработки, это имеет вполне определенное основание: в учебниках и монографиях спецкурсов многократно используются данные всех разделов физики – от классической механики до ядерной физики. Для технологической специальности такую ситуацию можно признать уникальной и сравнить разве что с уникальностью самой древесины, которая по объему использования и разнообразию применения превосходит любой другой материал, являясь при этом восстанавливаемым природным ресурсом.

Поскольку вопрос создания отдельного раздела «Физика древесины» в рамках курса общей физики является, по меньшей мере, дискуссионным, наиболее

целесообразным представляется чтение нескольких обзорных лекций, в которых делается акцент на непосредственную связь традиционного курса физики с древесиноведением и технологией обработки древесины.

Настоящее пособие написано как краткий конспект таких лекций, которые могут быть прочитаны в завершение курса физики либо читаться по отдельности в конце каждого семестра.

Материал таких лекций является прежде всего иллюстративным, поэтому авторы сочли необходимым привести только некоторые основные положения соответствующих разделов физики, о которых, по их мнению, инженер должен иметь представление в течение всего периода своей производственной деятельности.

## **ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ**

Дать краткое определение древесины как материала (по аналогии, скажем, с определениями металла или полупроводника) очень непросто. Например, можно представить древесину как пористый анизотропный материал сложного полимерного состава, но и в этом случае нужна определенная детализация.

Древесина состоит из разнообразных растительных клеток преимущественно удлиненной формы (волокон). Основными клетками, составляющими древесину хвойных пород, являются трахеиды, древесина лиственных

пород состоит из волокон либриформа и сосудов. Паренхимные клетки входят в состав как лиственных, так и хвойных пород.

Большая часть древесины растущего дерева и вся срубленная древесина состоит из мертвых клеток, сохранивших клеточную оболочку (стенку).

Клеточные стенки имеют сложную слоистую структуру и состоят в основном из полимеров: целлюлозы (до 58 %), гемицеллюлоз (~ 20 %) и лигнина (18-28 %). Целлюлоза является основой клеточной стенки и представляет собой линейный полимер полисахарид с длинными цепями макромолекул (степень полимеризации до 14000). Примерно 70 % целлюлозы обладает кристаллической структурой, в которой можно выделить несколько уровней упорядочения.

Группы в 30-40 цепных молекул целлюлозы составляют мельчайшие нитевидные образования – элементарные фибриллы с поперечным размером порядка  $3 \cdot 10^{-9}$  м. Элементарные фибриллы объединяются в более крупные лентоподобные образования - так называемые микрофибриллы толщиной до  $1 \cdot 10^{-8}$  м и шириной до  $3 \cdot 10^{-8}$  м, ориентированные преимущественно вдоль оси клетки или под небольшим углом к ней.

Микрофибриллы формируют целлюлозный каркас, внутри которого размещаются гемицеллюлозы, лигнин и вода, находящаяся между элементарными фибриллами

и микрофибриллами в виде непрерывных прослоек переменной (в зависимости от влажности) толщины.

Гемицеллюлозы – это полисахариды аморфной структуры, близкие по составу целлюлозе (с более короткими цепями).

Также аморфную структуру имеет лигнин – полимер сложного строения на основе ароматических спиртов.

Оба эти вещества выполняют в клеточной стенке функцию аморфного цементирующего состава, причем их аморфность в отличие от многих термопластичных полимеров (к которым подходит модель «сваренных в кастрюле макарон») предполагает жесткость структуры.

Переплетения микрофибрилл с разными углами наклона образуют слои клеточной стенки, в которой выделяются более крупные образования – макрофибриллы с поперечными размерами  $(3-5) \cdot 10^{-7}$  м.

Между макрофибриллами и внутри них в небольших количествах имеются пространства. Вместе с межмикрофибриллярными прослойками воды эти пространства формируют в клеточных стенках систему микрокапилляров, условный радиус которых меньше  $10^{-7}$  м.

В то же время полости клеток, имеющие сравнительно крупные поперечные размеры ( $10^{-4} - 10^{-5}$  м), соединены между собой порами и перфорациями и образуют в древесине макрокапиллярную систему с условным радиусом капилляра больше  $10^{-7}$  м.

В макрокапиллярах содержится так называемая «свободная» вода, в стенках клеток – «связанная» или гигроскопическая вода (древесина, содержащая только связанную воду – «влажная», содержащая, кроме того, и свободную воду – «сырая»).

Таким образом, даже отвлекаясь от породы дерева, условий произрастания и т.д., нужно отметить, что древесина, как материал сложной структуры, должна характеризоваться широким диапазоном механических и физико-химических параметров.

Плотность материала – одна из основных физических характеристик вещества, равная отношению массы тела к объему этого тела.

Понятие «плотность древесины» принадлежит к важнейшим понятиям древесиноведения. Его стали использовать для характеристики свойств древесины на заре возникновения самой науки о древесине. Такой интерес к вопросу объясняется тем, что древесина является материалом с нестабильными свойствами. Ее плотность зависит от многих факторов, а, в свою очередь, технологические и физико-механические свойства древесины зависят от ее плотности.

Плотность древесины как показатель качества древесного сырья имеет преимущества перед другими характеристиками, так как плотность как весовая характеристика уже является фактором качества. Транспортные расходы, вес конструкций из древесины или вес



деревянной тары в значительной степени определяются плотностью. На основе плотности можно рассчитать такой важный показатель, как весовая продуктивность древостоев. Плотность дает хорошее представление о механических свойствах древесины, что используется при прочностной сортировке пиломатериалов. Плотность влияет на качество многих материалов, получаемых из древесины. В целлюлозно-бумажном производстве плотность определяет важнейший экономический показатель – выход целлюлозы. Плотность определяет топливные свойства древесного сырья.

В связи с вышеизложенным способы определения плотности относятся к числу значимых вопросов. Одним из них является способ гидростатического взвешивания. Принцип этого способа основывается на законе Архимеда, согласно которому тело, погруженное в жидкость, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесняемая им жидкость. При использовании этого принципа для определения плотности древесины вначале определяют вес образца древесины в воздухе, а затем вес образца, полностью погруженного в жидкость. Кажущаяся потеря веса образца в жидкости равняется его подъемной силе.

Плотность древесины образца определяется как

$$\rho = \frac{G}{G - G_1}, \quad (1)$$

где  $G$  - вес образца древесины в воздухе;

$G_1$  - вес образца древесины в воде.

При использовании этого метода плотность древесины определяется только путем взвешивания.

На основе закона Архимеда реализуется способ определения плотности крупных образцов и целых сортиментов, например, при установлении плавучести древесины при подготовке ее к сплаву. В этом случае фиксируется длина образца или сортимента, и затем его погружают вертикально в воду. После этого измеряется высота выступающей из воды части.

Плотность древесины рассчитывают по формуле

$$\rho = \frac{H-h}{H} , \quad (2)$$

где  $H$  - длина образца или сортимента;

$h$  – длина части образца, выступающей над водой.

## МЕХАНИКА

В любой технической отрасли широко применяются положения таких разделов физической механики, как динамика, работа и энергия, механика твердого тела.

**Динамика** – раздел механики, изучающий движение и равновесие тел под действием приложенных к ним сил. Понятие силы, введенное И. Ньютоном, как векторной физической величины, являющейся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел, подразумевает проявление силы в изменении ско-

рости движущегося тела или формы и размеров тела. При этом сила, как и любая векторная величина, считается заданной, если известны ее числовое значение, направление и точка приложения.

По сути дела, динамика является основой получения информации о механических свойствах любых материалов, включая, естественно, древесину, хотя формально это относится к курсу сопротивления материалов. По сути же, механические свойства материала характеризуют его способность сопротивляться воздействию внешних сил, в зависимости от времени действия которых различают статические и динамические нагрузки.

Одним из важнейших показателей механических свойств древесины является предел прочности – максимальная величина напряжения, которое древесина выдерживает без разрушения. С учетом особенностей строения древесины определяется прочность при сжатии вдоль и поперек волокон, при растяжении (вдоль и поперек волокон), прочность при статическом изгибе, а также прочность древесины при сдвиге (скалывании вдоль и поперек волокон, перерезании волокон).

Особенностью прочностных характеристик древесины является то обстоятельство, что они зависят от влажности материала. Существенное влияние на свойства древесины оказывает только гигроскопическая влага, содержащаяся в клеточных стенках, причем

уменьшение количества связанной (гигроскопической) воды ведет к увеличению прочности. Обычно все показатели механических свойств сравниваются при нормализованной влажности, равной 12 %. Несложный пересчет показателей механических свойств к нормализованной влажности включает поправочный коэффициент на влажность  $\alpha$ , показывающий, насколько меняется показатель данного свойства при изменении влажности на 1 %.

Древесина способна изменять свои размеры и форму под действием внешних сил («деформативность» древесины). При кратковременных воздействиях относительно небольших нагрузок древесина ведет себя как упругий материал и подчиняется закону Гука:

$$F_{упр.} = -kX, \quad (3)$$

где  $F_{упр.}$  - сила упругости, Н;

$k$  - коэффициент упругости, Н/м;

$X$  - линейная деформация, м.

В пересчете на напряжения закон трансформируется:

$$E_{упр.} = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (4)$$

где  $E_{упр.}$  - модуль упругости, Па;

$\sigma$  - напряжение, Па;

$\varepsilon$  - относительная деформация (растяжения или сжатия).

Модуль упругости характеризует жесткость древесины.

Помимо модуля упругости, определяются также коэффициенты поперечной деформации и модули сдвига.

Древесина является ортотропным материалом, т.е. имеет три взаимно перпендикулярные оси структурной симметрии, одновременно являющиеся осями симметрии механических свойств. Поэтому показатели деформативности меняются в зависимости от направления действия нагрузки относительно волокон и годичных слоев.

Оказывается, что увеличение времени нагружения меняет характер деформации. В соответствии с представлениями реологии (науки о деформациях, текучести материалов, релаксации напряжений) древесина является, по сути, упруговязкопластичным образованием. При малом времени нагружения происходит мгновенная упругая деформация за счет деформации целлюлозного скелета. Эластическая (упруговязкая) деформация развивается во времени и связана с вязким сопротивлением аморфного наполнителя (главным образом, воды и лигнина) перемещениям целлюлозного скелета. При повышении нагрузок и достаточно длительном времени воздействия наблюдается пластическая деформация с необратимыми локальными разрушениями целлюлозного скелета.

Количественные параметры, характеризующие поведение древесины при деформации, – это реологические коэффициенты (модуль упругости  $E_{упр.}$  и длительный модуль упругости  $E$ ), а также реологические переменные (напряжение  $\sigma$  и относительная степень деформации  $\epsilon$ ). С повышением температуры и влажности реологические коэффициенты уменьшаются, т.е. податливость древесины увеличивается и это соответствует общим представлениям о влиянии температуры и пластификатора (влаги) на деформативность полимеров.

Весьма интересной представляется связь основного закона динамики – второго закона Ньютона – и формирования строения древесины в растущих в наклонном положении или подвергающихся действию внешней нагрузки во время роста стволах.

Общеизвестно, что в системе отсчета, связанной с Землей, на тело с массой  $m$ , кг, действует сила тяжести  $P$ , Н:

$$P = mg \quad , \quad (5)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения,  $м/с^2$ .

Если пренебречь суточным вращением Земли, то сила тяжести и сила гравитационного тяготения (по закону всемирного тяготения) равны между собой. По мере роста наклоненных стволов, а также ветвей их масса увеличивается и соответственно увеличивается грави-

тационное притяжение. В стволе растущего дерева формируется кренивая и тяговая, или реактивная (имеется в виду реакция на гравитацию или внешнюю нагрузку), древесина. Кренивая древесина встречается у хвойных, а тяговая - у лиственных пород. Реактивная древесина служит упрочнению ствола. Кренивая и тяговая древесина отличаются строением, химическим составом и физико-механическими свойствами от нормальной древесины.

**Работа и энергия.** Работа в механике – это характеристика действия силы. Работа, совершаемая постоянной силой  $F$ ,  $N$ , при перемещении на прямолинейном участке пути  $S$ ,  $m$ , равна:

$$A = F S \cos \alpha = F_s \cos \alpha \quad , \quad (6)$$

где  $A$  - работа, Дж;

$F_s$  - проекция силы на направление перемещения,  $N$ ;

$\alpha$  - угол между векторами силы  $F$  и перемещения  $S$ .

В общем случае при действии переменной силы рассматривается элементарное перемещение  $dS$  и выражение для работы в пределах перемещения от  $S_1$  до  $S_2$  представляет интеграл:

$$A = \int_{S_1}^{S_2} F dS \cos \alpha = \int_{S_1}^{S_2} F_s dS. \quad (7)$$

Величина затраченной работы является важной характеристикой многих технологических операций де-

ревообработки, прежде всего обработки древесины резанием.

Не менее важным параметром является скорость выполненной работы, т. е. мощность, численно равная работе, совершаемой в единицу времени:

$$N = \frac{dA}{dt}, \quad (8)$$

где  $N$  - мощность, Дж/с (Вт).

С учетом  $dA = F dS$  мощность может быть выражена через силу, которая совершает работу

$$N = \frac{FdS}{dt} = FV, \quad (9)$$

где  $V$  - скорость перемещения под действием силы  $F$ , м/с.

Одним из фундаментальных понятий физики является понятие энергии, которую можно кратко определить как функцию состояния системы, характеризующую способность выполнения работы. В механике это, во-первых, энергия движущегося тела – кинетическая энергия:

$$E_k = \frac{mV^2}{2}, \quad (10)$$

где  $E_k$  - кинетическая энергия, Дж;

$m$  - масса тела, кг;

$V$  - скорость тела, м/с.

Во-вторых, это потенциальная энергия, определяемая конфигурацией системы, т.е. взаимным распо-



ложением тел (частей тела) и характером сил взаимодействия между ними.

В принципе выполненная работа всегда равна разности энергий в конечном и начальном состоянии системы. При этом работа двух видов сил – тяготения и упругости – равна разности потенциальных энергий и не зависит от формы пути. Это консервативные, или потенциальные, силы.

Потенциальная энергия сил тяготения вблизи Земли:

$$E_p = mgh, \quad (11)$$

где  $h$  – высота подъема тела относительно условно нулевого уровня энергии, м.

Потенциальная энергия сил упругости:

$$E_s = \frac{kx^2}{2}, \quad (12)$$

где  $x$  – длина растяжения (сжатия) пружин, м.

Для систем, в которых действуют только консервативные силы, выполняется закон сохранения механической энергии

$$E_p + E_k = const. \quad (13)$$

Данное соотношение используется при изучении одного из важных эксплуатационных свойств древесины – способности сопротивляться действию динамических нагрузок, называемой ударной вязкостью, а также ударной твердостью.

Ударная вязкость определяется как максимальная работа, поглощенная образцом без разрушения, отнесенная к единице площади образца.

Испытания проводятся на маятниковом копре, причем в исходном положении маятник обладает потенциальной энергией, определяемой высотой его подъема  $h$ .

При падении маятник одним ударом разрушает образец и поднимается на высоту  $h_2$ . При этом работой неконсервативных сил (сил трения) можно пренебречь и работа разрушения образца  $Q$  определяется как

$$Q = \frac{mV^2}{2} = mgh_1 - mgh_2, \quad (14)$$

где  $m$  - масса маятника, кг;

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Справедливости ради следует отметить, что  $Q$  зависит от размеров образца и характеристик копра, поэтому показатели ударной вязкости служат лишь для сравнительной оценки качества древесины.

При испытании на ударную твердость мерой твердости служит величина отпечатка, получающегося на исследуемой поверхности древесины после сбрасывания на нее с высоты стального шарика, т. е. при постоянной работе. Отпечаток имеет овальную форму; больший диаметр его направлен поперек волокон, а

меньший - вдоль. Твердость  $H_w$  при данной влажности вычисляют в Дж/см<sup>2</sup> по формуле

$$H_w^y = \frac{4Gh}{\pi d_1 d_2}, \quad (15)$$

где  $G$  - вес шарика, Н;

$h$  - высота падения шарика, м;

$d_1$  и  $d_2$  - диаметры отпечатка, см.

Ударная твердость древесины зависит от ее влажности, плотности. Менее изменчивые показатели ударной твердости получаются при сбрасывании шарика на радиальную поверхность, что связано с особенностями строения древесины.

**Механика твердого тела.** В этом разделе механики рассматриваются динамические характеристики вращательного движения, основными из которых являются момент инерции и момент силы. Момент инерции твердого тела играет роль массы при поступательном движении и равен сумме моментов инерции материальных точек, из которых состоит это тело:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2, \quad (16)$$

где  $m$  - масса материальной точки, кг;

$r$  - расстояние точки до оси вращения, м.

Характер вращательного движения задается моментом силы  $M$  относительно оси вращения «О», равным векторному произведению радиус-вектора  $R$ , про-

веденного из точки «О» в точку приложения силы  $F$ , и самой этой силы. Модуль момента силы

$$M=FR \sin \alpha = Fr , \quad (17)$$

где  $\alpha$  - угол между  $R$  и  $F$ ;

$r=R \sin \alpha$  - «плечо» силы, м.

С учетом кинематических параметров вращательного движения – углового перемещения  $\varphi$ , рад, угловой скорости  $\omega$ , рад/с, углового ускорения  $\varepsilon$ , рад/с<sup>2</sup>, - легко получить формулы динамики вращательного движения, которые, по сути, аналогичны таковым для поступательного движения. Например, 2-й закон Ньютона

$$\vec{M} = J \vec{\varepsilon} = \frac{d\left(J \vec{\omega}\right)}{dt}. \quad (18)$$

Отдельно следует остановиться на выражениях для работы и мощности при вращательном движении:

$$A = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M d \varphi , \quad (19)$$

$$N=M\omega=M2\pi\nu , \quad (20)$$

где  $\nu$  - число оборотов в секунду.

Эти соотношения применяются при расчетах различных вращающихся элементов деревообрабатывающего оборудования.

Интересным примером технологического использования вращательного движения является ротацион-

ное обезвоживание древесины (обезвоживание в поле центробежных сил). Сущность метода, разработанного в Московском университете леса, заключается в центрифугировании лесоматериалов, размещенных таким образом, чтобы центр вращения проходил посередине их длины, а вектор центробежной силы совпадал с осью сортимента – в этом случае обезвоживание происходит вдоль волокон.

**Механические колебания и волны.** В курсе общей физики изучение колебаний начинается с механических колебаний, как наиболее простых и понятных и в то же время позволяющих установить общие закономерности колебательных процессов различной природы (в том числе электромагнитных колебаний).

Простейшими периодическими колебаниями являются гармонические, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса или косинуса:

$$X = A \cos(\omega t + \alpha), \quad (21)$$

где  $X$  - смещение от положения равновесия, м;

$A$  - максимальное смещение (амплитуда), м;

$\omega$  - циклическая (круговая) частота, рад/с, связанная с частотой  $\nu$ , 1/с, и периодом колебаний  $T$ , с, соотношением

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu ;$$

$\omega t + \alpha$  - фаза колебаний, определяет смещение в момент времени  $t$ ;

$\alpha$  - начальная фаза (при  $t=0$ ).

Из курса математики известно (теорема Фурье), что любое сложное периодическое колебание можно представить как сумму простейших гармонических колебаний (гармоник).

Колебания, происходящие с постоянной амплитудой, называются незатухающими, а колебания с постепенно уменьшающейся амплитудой – затухающими, при этом уменьшение начальной амплитуды  $A_0$  происходит по экспоненте

$$A = A_0 \cdot e^{-\beta t}, \quad (22)$$

где  $\beta$  - коэффициент затухания, характеризующий силу сопротивления колебаниям в конкретной среде, 1/с;

$t$  – время, с.

Как правило, на практике очень часто пользуются безразмерной величиной  $L$  – логарифмическим декрементом затухания, равным натуральному логарифму отношения амплитуд, следующих друг за другом через время, равное периоду колебания  $T$ :

$$L = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}. \quad (23)$$

Логарифмический декремент связан с коэффициентом затухания  $\beta$  соотношением

$$L = \beta T. \quad (24)$$

В системе, предоставленной самой себе, после того, как она выведена из положения равновесия, проис-

ходят колебания, называемые свободными или собственными. Обычно циклическая частота собственных колебаний обозначается  $\omega_0$ .

Колебания, возникающие под действием внешней периодически изменяющейся силы  $F_{вн}=F_0 \cos \omega t$ , называют вынужденными;  $\omega$  - частота вынужденных колебаний.

Если задана амплитуда вынуждающей силы  $F_0$  и параметры колебательной системы, то амплитуда и фаза вынужденных колебаний определяются частотой вынуждающей силы.

Без учета сил сопротивления колебаниям амплитуда вынужденных колебаний

$$A = \frac{F_0}{m|\omega_0^2 - \omega^2|}, \quad (25)$$

где  $m$  – масса колебательной системы, кг.

Видно, что чем меньше разность собственной частоты  $\omega_0$  и частоты вынуждающей силы  $\omega$ , тем больше амплитуда вынужденных колебаний. При определенном (близком к  $\omega_0$ ) значении  $\omega$  происходит резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний («механический резонанс»).

В любой момент времени энергия колебаний определяется величиной амплитуды:

$$E = m\omega^2 \frac{A^2}{2}, \quad (26)$$

где  $m$  - масса колеблющейся точки, кг;

$\omega$  - циклическая частота, рад/с;

$A$  - амплитуда колебаний, м.

Механические колебания используются для диагностики состояния и получения информации об эксплуатационных свойствах как деревообрабатывающего оборудования, так и изделий, конструкций, деталей и моделей из древесины.

Так, например, элементы конструкций деревянных мостов подвергаются испытаниям вибрационными нагрузками (обычно с несимметричными знакопеременными и пульсирующими циклами) при частоте колебаний менее 50 Гц.

Один из важных методов испытания древесины связан с воздействием на нее механических колебаний звуковой (от 16 Гц до 20 Гц) и ультразвуковой (более 20 кГц) частот. В случае приложения знакопеременных нагрузок наряду с проявлением упругих свойств в древесине происходят необратимые повреждения на молекулярном уровне, приводящие к остаточным деформациям и разрушению даже при относительно небольшой величине напряжений («усталость» древесины).

Характер накопления деформаций и разрушение древесины описываются в рамках термофлуктуационной теории деформации полимеров. Причиной возникновения первичных микрповреждений в полимерах яв-



ляются тепловые флуктуации, в результате которых происходит резкое возрастание кинетической энергии отдельных атомов, колеблющихся около положения равновесия. Это может приводить к разрыву химической связи в основной цепи полимера. Напряжения, возникающие от приложенной извне нагрузки, уменьшают вероятность восстановления этих связей, придавая тем самым направленность процессу развития повреждений.

Обоснованием подобного механизма явилось совпадение летучих продуктов при механическом разрушении и при термической деструкции большого количества полимеров, включая целлюлозу. Поскольку термическая деструкция представляет собой процесс, состоящий из термофлуктуационных актов, термофлуктуационный характер разрушения, таким образом, подтверждается экспериментально.

Возникшие микрповреждения развиваются в виде микротрещин, которые объединяются, прорастают через все поперечное сечение образца, приводя к его разрушению. С учетом того, что даже не содержащая пороков древесина уже имеет в своей структуре развитую систему пор, вторичная стадия усталостной деформации, заканчивающаяся разрушением, происходит с заметными скоростями.

По результатам усталостных испытаний определяется «предел выносливости» древесины, величина ко-

того характеризует ее способность сопротивляться переменным или вибрационным нагрузкам. Он представляет собой то наибольшее напряжение, которое материал может выдержать без разрушения при неограниченном числе циклов нагружения. Средняя величина предела выносливости для древесины составляет примерно 20 % от статического предела прочности.

Явление резонанса в области звуковых частот для древесины известно издавна и заключается в ее способности усиливать звук без искажения тона. Резонансные качества древесины приблизительно можно оценить по так называемой «акустической константе»  $K$ :

$$K = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}, \quad (27)$$

где  $E$  - динамический модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>;

$\rho$  - плотность древесины, кг/м<sup>3</sup>.

Наибольшая величина акустической константы характерна для хвойных пород (ель, пихта, кедр), которые (прежде всего ель) и используются для изготовления дек музыкальных инструментов и акустических систем высокого класса. Вместе с тем к резонансной древесине предъявляются повышенные требования по структуре – отсутствие пороков, определенная ширина годичных слоев. Наилучшими резонансными свойствами обладает древесина длительной выдержки (50 лет и более), так как за время выдержки уменьшается содержание гемицеллюлоз и такая древесина оказывается более

устойчивой к воздействиям температуры и влаги, что приводит к большей стабильности ее звуковых характеристик.

Выбрать резонансную древесину (в частности ель) непосредственно в лесу очень непросто. Как правило, годными к изготовлению музыкальных инструментов оказываются только 10-15 деревьев на один гектар леса.

Возбужденные локально колебания в какой-либо точке среды распространяются в виде волн. Колебания распространяются с конечной скоростью, зависящей от свойств среды. Чем дальше расположена частица среды от источника колебаний, тем позднее она начнет колебаться. Следовательно, фазы колебаний частиц среды и источника тем больше отличаются друг от друга, чем больше расстояние между ними. При распространении волны частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частице среды передаются лишь состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому основным свойством всех волн независимо от их природы является перенос энергии без переноса вещества.

Упругими, или механическими, волнами являются колебания, распространяющиеся в упругой среде. Они делятся на продольные, когда частицы колеблются в направлении распространения волны, и поперечные,

когда частицы среды колеблются в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны. Последние могут распространяться в среде, подверженной упругой деформации сдвига, т. е. только в твердых телах. Продольные волны распространяются в средах, в которых возникают упругие силы при деформации сжатия и растяжения, т. е. в твердых, жидких и газообразных телах. Продольными являются звуковые волны.

Скорость распространения волны  $V$  зависит от плотности среды.

Для продольных волн

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (28)$$

где  $E$  - динамический модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>;

$\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Для поперечных волн

$$V = \sqrt{\frac{N}{\rho}}, \quad (29)$$

где  $N$  – модуль сдвига, Н/м<sup>2</sup>.

Расстояние, которое проходит волна за время, равное периоду колебаний, – это длина волны:

$$\lambda = VT, \quad (30)$$

где  $\lambda$  - длина волны, м;

$V$  - ее скорость, м/с;

$T$  - период колебаний, с.

В общем виде уравнение волны представляет собой функцию времени и трех пространственных координат. В самом простом частном случае, когда волна распространяется вдоль оси  $r$ , переменных остается только две.

Тогда уравнение волны записывается как

$$X = A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r\right), \quad (31)$$

где  $X$  - смещение колеблющейся точки относительно положения равновесия, м;

$A$  – амплитуда колебаний, м;

$\omega$  - циклическая частота колебаний, м;

$t$  - время, с;

$\lambda$  – длина волны, м;

$r$  - расстояние колеблющейся точки от источника колебаний, м.

В древесиноведении наибольшее внимание уделяется вопросам распространения в материале звуковых волн. Это связано прежде всего с достаточно широким использованием древесины в качестве строительного материала. При этом на первый план выходят две связанные между собой характеристики – звукоизоляционная и звукопоглощающая способность древесины.

Громкость звука определяется амплитудой колебаний, которая, в свою очередь, связана с энергией звуковой волны. Понятие «сила», или «интенсивность», звука  $J$  - это энергия звуковой волны, проходящая че-

рез единицу площади в единицу времени, т. е.  $[J] = \frac{Дж}{м^2 \cdot с} = \frac{Вт}{м^2}$ . Порог слышимости  $J_0$  составляет около  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> и обнаруживает зависимость от частоты колебаний (высоты тона). Максимальное значение  $J_0$  приходится на 2 кГц. Шкала уровней силы звука представлена в безразмерных единицах  $L$ , но для удобства принято обозначать  $L$  в децибелах:

$$L = 10 \lg \frac{J}{J_0} . \quad (32)$$

Звукоизоляционная способность древесины  $R$  определяется простым соотношением

$$R = L_1 - L_2 , \quad (33)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  - уровень силы звука соответственно до и после образца.

Обратная по смыслу величина называется коэффициентом звукопроницаемости  $\tau$  и определяется как

$$\tau = \frac{J_2}{J_1} , \quad (34)$$

где  $J_2$  и  $J_1$  – интенсивность звука после и до образца.

Звуковая изоляция массивной древесины сравнительно невысока и, естественно, коррелирует с ее звукопоглощающей способностью. Поглощение звуковой энергии вызвано необратимыми диссипативными тепловыми потерями, а также рассеянием звуковой энергии в структурных полостях материала и на дефектных участках.

Показателем звукопоглощения служит коэффициент звукопоглощения  $\alpha$ , характеризующий потерянную часть энергии и равный отношению звуковой энергии, теряемой в материале, к энергии падающей волны:

$$\alpha = \frac{J_2 - J_1}{J_1} \quad (35)$$

Для сравнения можно указать, что коэффициент поглощения сосны примерно в 2-3 раза ниже, чем у мягкой ДВП.

Коэффициент звукопоглощения возрастает с увеличением пористости материала и зависит также от частоты звука: на частоте 2000 Гц коэффициент  $\alpha$  в 2,5 раза выше, чем на частоте 250 Гц.

Способность звуковых волн ослабляться, а также преломляться и отражаться при переходе из одной среды в другую используется для контроля качества древесины, причем наиболее эффективна дефектоскопия в ультразвуковом диапазоне длин волн (50 - 500 кГц).

Существует два основных метода использования ультразвука для неразрушающего контроля качества древесины. Первый из них – это так называемый импульсный метод, или метод звукового эха. Ультразвуковой импульс, попадая на дефект, отражается от него и регистрируется раньше, чем импульс, отраженный от граничной поверхности материала. Таким образом, по разности прохождения волн через здоровые и дефект-

ные участки можно определить пороки древесного материала. Вторым методом используется регистрация ультразвуковой волны, прошедшей через материал (это метод звуковой тени), т. е. ультразвуковые колебания непрерывно проходят через образец и принимаются детектором. Если порок (например сучок) велик по сравнению с длиной волны, то происходит сильное отражение или рассеяние.

Оба метода позволяют обнаруживать скопления смолы (кармашки), водослой, сучки и гнили. Однако серьезным недостатком ультразвуковых методов является необходимость плотного контакта излучающего и приемного датчиков с исследуемым материалом. Кроме того, сложность структуры древесины, зависимость скорости и интенсивности ультразвуковых волн от влажности и температуры окружающей среды создают определенные трудности в расшифровке получаемых данных. Наиболее целесообразной оказывается ультразвуковая дефектоскопия деревянных опор линий электропередач.

## **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

Положения этого раздела курса широко используются при описании процессов гидротермической обработки и консервирования древесины.



Молекулярная физика изучает строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений, основанных на том, что все тела состоят из молекул, которые непрерывно и хаотически движутся. Поскольку любая макросистема содержит огромное количество молекул, свойства системы и процессы в ней изучаются с помощью статистических методов, оперирующих усредненными значениями динамических величин (скорость, энергия и т.д.). Термодинамика рассматривает общие свойства макросистем, находящихся, как правило, в состоянии равновесия. Термодинамика базируется на двух фундаментальных законах (началах), установленных в результате обобщения опытных данных, и определяет связи между макроскопическими свойствами вещества, не вникая в детали его строения и механизмы происходящих в нем процессов. Оба метода – молекулярно-кинетический и термодинамический несмотря на различие подходов, имеют одну задачу и взаимно дополняют друг друга, образуя единое целое.

**Термодинамические параметры. Уравнения состояния.** Состояние макроскопической системы задается совокупностью физических величин, характеризующих ее свойства. Это так называемые термодинамические параметры состояния. Обычно в качестве параметров состояния выбираются масса системы  $M$ , кг,

ее объем  $V$ , м<sup>3</sup>, давление  $P$ , Н/м<sup>2</sup>=Па, и температура  $T$ , К.

Понятие фундаментального термодинамического параметра – температуры – в молекулярно-кинетической теории связывается с энергией молекул и может быть выражена из соотношения

$$\bar{E}_k^{nocm} = \frac{3}{2}kT, \quad (36)$$

где  $\bar{E}_k^{nocm}$  - средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул, Дж;

$k$  - постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Термодинамическое равновесие системы предполагает постоянство ее состояния с течением времени. Связь термодинамических параметров в равновесии определяется уравнением состояния в соответствии с используемыми моделями макросистем.

Модель идеального газа пренебрегает объемом молекул по сравнению с объемом сосуда, силами взаимодействия между молекулами и считает столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругими. Удары молекул о стенки определяют величину давления  $P$ , которое зависит от массы молекулы, их количества в объеме и от скорости:

$$P = \frac{1}{3}mn\bar{V}^2 = \frac{2}{3}n\bar{E}_k^{nocm} = nkT, \quad (37)$$

где  $m$  - масса молекул газа, кг;

$n$  - концентрация (число молекул в единице объема),  $1/\text{м}^3$ ;

$\bar{v}^2$  - средняя квадратичная скорость, м/с.

Уравнение (37) называется основным уравнением молекулярно-кинетической теории.

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории вытекает в конечном счете, уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона-Менделеева):

$$PV = \frac{M}{\mu} RT, \quad (38)$$

где  $P$  - давление, Па;

$V$  - объем,  $\text{м}^3$ ;

$M$  - масса газа, кг;

$\mu$  - масса одного моля, кг/моль;

$R=8,31$  Дж/(моль·К) - универсальная газовая постоянная;

$T$  - температура, К.

В технологических процессах обработки древесины, прежде всего нагрева и сушки, газообразная среда, воздействующая на материал, близка по своим свойствам к идеальному газу. Это относится к атмосферному воздуху с относительно низким парциальным давлением водяных паров при давлениях, незначительно превышающих атмосферное, и температурах выше точки росы.

Таким образом, в широком диапазоне технологических условий термической обработки древесины уравнение Менделеева-Клапейрона может быть непосредственно использовано для расчетов.

Вместе с тем повышение давления и уменьшение объема, в котором осуществляется хаотическое движение молекул, приводит к уменьшению среднего расстояния между молекулами. Поэтому в рамках второй модели макросистем – модели реального газа – учитывается собственный объем молекул и силы межмолекулярного взаимодействия (практически всегда силы притяжения).

Учет конечных размеров молекул и предельного расстояния, на которое молекулы могут сблизиться (т.е. учет объема зазоров между молекулами при их плотной упаковке), дает поправку « $v$ »,  $m^3$ , и объем, в котором молекулы могут перемещаться, становится равным  $V-v$ .

Вторая поправка  $a/V^2$  к давлению учитывает силы взаимодействия между молекулами реальных газов. Эта поправка представляет собой внутреннее давление, возникающее из-за взаимного притяжения между молекулами. Сила притяжения двух элементарных объемов реального газа, имеющих размер порядка радиуса молекулярного действия, пропорциональна концентрации газа как одного, так и другого объема, т.е. пропорциональна квадрату концентрации и, следовательно,

обратно пропорциональна квадрату объема. В итоге для одного моля реальных газов уравнение состояния переписывается в виде уравнения Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT. \quad (39)$$

Это уравнение третьей степени относительно объема  $V$ , т.е. одному значению давления  $P$  может соответствовать три значения объема. На изотермах  $P$ - $V$  уравнения (39) действительно наблюдается такая зона («горбы» и «впадины»), подтверждаемая экспериментами (изотерма Эндрюса) и свидетельствующая, что постоянное давление при изменении объема – это давление насыщенного пара. То есть уравнение Ван-дер-Ваальса отражает наличие двухфазной области при конденсации пара в жидкость. Вид изотерм зависит от температуры: при повышении температуры двухфазная зона сокращается, а по достижении «критической температуры»  $T_k$  конденсация исчезает и вещество становится однофазным, при  $T > T_k$  оно не может быть в жидком состоянии.

Для водяных паров, использующихся в качестве обрабатывающего агента в гидротермической обработке древесины, критическая температура равна  $374^\circ\text{C}$ , поэтому при более низких температурах пар может находиться в двухфазном состоянии. Следует также учитывать микрообъемы и субмикрообъемы полостей кле-

ток и клеточных стенок, содержащих при температурах сушки воду и пар, т.е. для описания этого состояния уравнение Ван-дер-Ваальса вполне может быть использовано.

**Явления переноса.** Одним из условий равновесного состояния термодинамической системы является отсутствие в ней потоков вещества и энергии, однако в веществе могут возникать пространственные неоднородности плотности, температуры или скорости упорядоченного движения слоев газа (жидкости). За счет беспорядочного теплового движения молекул и непрерывных столкновений между ними происходит самопроизвольное выравнивание этих неоднородностей. Такие процессы получили общее название явлений переноса. К ним относятся теплопроводность, диффузия и внутреннее трение (вязкость). Теплопроводность и диффузия могут происходить в телах, находящихся в любом из трех агрегатных состояний, внутреннее трение характерно главным образом для газов и жидкостей.

Закономерности явлений переноса и их уравнения были установлены на примере газов.

Теплопроводность возникает при наличии разности температур, т.е. молекулы газа в разных местах его объема имеют разные кинетические энергии. Молекулы, попавшие из нагретых частей объема в более хо-

лодные, отдают часть своей энергии окружающим частицам, а молекулы из холодных частей объема увеличивают свою энергию, попадая в более нагретую часть объема, за счет соударения с молекулами бóльших энергий.

Диффузия заключается в самопроизвольном проникновении и перемешивании частиц газов, жидкостей и твердых тел и сводится к обмену массами частиц этих тел вследствие неодинаковой плотности в различных частях объема. При постоянной температуре диффузия в газах осуществляется путем переноса массы газа из мест с большей плотностью (концентрацией) в места, где плотность газа меньше.

Внутреннее трение (вязкость) возникает между слоями газа (жидкости), перемещающимися параллельно друг другу с различными по модулю скоростями. Средний импульс молекул слоя, движущегося быстрее, больше, и их попадание в более медленный слой вызывает действие ускоряющей силы. Наоборот, частицы из медленно движущихся слоев, попадая в быстро движущиеся слои, тормозят их. Силы трения, которые при этом возникают, направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев, а суммарный эффект при этом – выравнивание скорости слоев.

Поскольку в основе всех этих трех физических явлений лежит один и тот же молекулярный механизм –

тепловое движение и перемешивание молекул - уравнения явлений переноса оказались подобными по форме.

В простейшем случае одномерных явлений переноса (вдоль оси  $X$ ) сила внутреннего трения записывается в виде уравнения И. Ньютона:

$$F = -\eta \frac{dV}{dx} \Delta S, \quad (40)$$

где  $F$  - сила внутреннего трения, Н;

$\eta$  - коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость), Па·с;

$\frac{dV}{dx}$  - градиент скорости, 1/с;

$\Delta S$  - площадь соприкосновения слоев, м<sup>2</sup>, на которую действует сила  $F$ .

Уравнение теплопроводности (закон Фурье):

$$\Delta Q = -\lambda \frac{dT}{dx} dSdt, \quad (41)$$

где  $\Delta Q$  - переносимая тепловая энергия, Дж;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\frac{dT}{dx}$  - градиент температуры, К/м;

$dS$  - площадь переноса энергии, м<sup>2</sup>;

$dt$  - время, с.

Уравнение диффузии (закон Фика):

$$\Delta M = -D \frac{d\rho}{dx} dSdt, \quad (42)$$

где  $\Delta M$  - переносимая масса вещества, кг;

$D$  - коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;



$\frac{d\rho}{dx}$  - градиент плотности, кг/м<sup>4</sup>;

$dS$  - площадь, через которую осуществляется перенос, м<sup>2</sup>;

$dt$  - время переноса, с.

Знак минус во всех уравнениях показывает, что перенос осуществляется в сторону уменьшения соответственно скорости, температуры и плотности.

Коэффициенты  $\eta$ ,  $\lambda$  и  $D$  определяются веществом, в котором осуществляется перенос, и зависят от температуры.

Величины коэффициентов переноса имеют важное значение для выбора технологических режимов гидротермической обработки древесины, а в ряде случаев определяют ее эксплуатационные свойства.

Гидротермическая обработка древесины связана с перемещениями потоков тепла и вещества (воды и пара) в обрабатываемом материале и окружающей его газообразной или жидкой среде. И хотя на первое место здесь выходят тепловые свойства древесины и агентов обработки, коэффициенты динамической вязкости газопаровой смеси и жидкостей обязательно приходится учитывать при расчетах. Это касается прежде всего тепловой обработки древесины (нагревания и оттаивания), когда теплообмен осуществляется за счет конвекции, т.е. когда тепловые потоки связаны со свободным или вынужденным течением газа или жидкости. Как из-

вестно, к основным технологическим целям тепловой обработки древесины относятся снижение твердости древесины для улучшения качества ее механической обработки, повышение податливости древесины для облегчения гнутья и прессования и, наконец, ускорение процессов склеивания. На конвективном теплообмене основаны:

- тепловая обработка в открытых бассейнах в воде при температуре до 20 °С;
- тепловая обработка водой в специальных бассейнах при 40-90 °С, называемая провариванием;
- тепловая обработка насыщенным водяным паром, называемая пропариванием;
- тепловая обработка сухим горячим воздухом или топочными газами.

Второй и третий виды обработки используются для подготовки древесины для лущения (получение лущеного шпона), гнутья (изготовление гнутых заготовок) и прессования (прессованная древесина), а обработка сухим горячим воздухом обычно направлена на интенсификацию процесса сушки древесины.

Естественно, при всех видах тепловой обработки важно знать  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности древесины. Кроме того, величину  $\lambda$  необходимо учитывать

при использовании древесины в качестве строительного материала.

Теплопроводность сухой древесины невелика, что обусловлено ее пористым строением и заполнением полостей воздухом.

Поскольку теплопроводность воды в 23 раза больше теплопроводности воздуха, влажность древесины повышает ее теплопроводность. Теплопроводность древесины зависит также от направления потоков тепла: вдоль волокон теплопроводность примерно в 2 раза выше, чем поперек, а в радиальном направлении  $\lambda$  на 15 % больше, чем в тангенциальном.

В среднем величина  $\lambda$  для древесины находится в пределах 0,12 - 0,39 Вт/(м·К), что в принципе сопоставимо с коэффициентом теплопроводности традиционных теплоизоляционных материалов – пенопластов, пенобетонов и т.д. – от 0,02 до 0,2 Вт/(м·К). Невысокая теплопроводность древесины является одним из факторов, определяющих ее широкое применение в жилищном строительстве. Вместе с тем следует отметить, что низкая теплопроводность древесины во многом обуславливает возникновение термических напряжений при ее тепловой обработке, в частности, в процессе сушки.

Диффузионные уравнения переноса массы являются также основой анализа технологических процес-

сов гидротермической обработки, прежде всего сушки и пропитки древесины.

Для процессов удаления влаги непосредственное использование уравнения Фика носит ограниченный характер. Его можно применять, например, для рассмотрения удаления свободной влаги вблизи поверхности материала на глубине до нескольких миллиметров, где поддерживается постоянный градиент плотности водяного пара. Вместе с тем уже в ближайших к поверхности слоях на массоперенос влаги влияет капиллярная проницаемость микро- и субмикрокапилляров клеточных стенок, а также характер взаимодействия связанной воды с целлюлозно-лигниновым каркасом. Поэтому общие расчетные уравнения влагопереноса при сушке древесины могут сохранять внешнее подобие уравнения Фика, но содержат не теоретические, а эффективные коэффициенты диффузии, определяемые опытным путем.

Процесс пропитки древесины происходит при ее контакте с жидкой фазой и имеет целью изменение ее эксплуатационных свойств, например, повышение биологической стойкости, огнестойкости, прочности, снижение электропроводности, гигроскопичности и т.д. Пропитывающие вещества разнообразны по свойствам и, как правило, не вступают с древесиной в химическое взаимодействие и не адсорбируются ею. Поэтому про-

питку можно рассматривать как совокупность процессов движения жидкости под действием капиллярных сил, избыточного давления, а также диффузионного перемещения молекул или ионов пропитывающих веществ по полостям клеток древесины, частично или полностью заполненных водой.

Для древесины, не содержащей (или содержащей мало) свободной воды, диффузионная пропитка неприменима. Однако если сырая древесина погружена в раствор соли или покрыта замешанной на растворе пастой, то ионы соли диффундируют из раствора в воду, заполняющую полости клеток, и плотность диффундирующего потока вполне удовлетворительно описывается уравнением Фика.

Коэффициент диффузии тех или иных веществ для свободных растворов  $D_0$  может быть рассчитан теоретически при известной температуре, вязкости растворителя и радиуса диффундирующего иона или взят из справочной литературы. Вместе с тем очевидно, что диффузия молекул или ионов в древесине протекает значительно медленнее, чем в свободном растворе, так как лишь часть поперечного сечения ее капиллярной системы заполнена водой и диффундирующие частицы вынуждены преодолевать дополнительные сопротивления при прохождении через мембраны пор. Расчетные значения коэффициентов диффузии для свежес-

срубленной древесины хвойных пород составляют  $0,649D_0$  в направлении вдоль волокон и всего лишь  $0,045D_0$  в направлении поперек волокон. Этим значениям близки коэффициенты диффузии, полученные экспериментально.

**Смачивание и капиллярные явления.** Этот раздел молекулярной физики является базовым в разработке технологических режимов пропитки, где под пропиткой понимаются процессы введения в древесину веществ, которые изменяют ее свойства (повышают биостойкость и огнестойкость, снижают электропроводность, гигроскопичность, увеличивают прочность и т.д.).

Особенностью конденсированного состояния, в частности жидкого, является наличие поверхностного натяжения. Равнодействующая сила взаимодействия для молекул поверхностного слоя в отличие от равнодействующей взаимодействия молекул объема не равна нулю и направлена от поверхности вглубь жидкости. То есть молекулы поверхности имеют большую потенциальную энергию. В соответствии с принципом устойчивого состояния – принципом минимума потенциальной энергии – поверхность жидкости стремится сократиться (чем меньше молекул в поверхности, тем меньше суммарная потенциальная энергия). Таким образом появляется натянутый слой жидкости, причем поверхностное натяжение направлено вдоль поверхности, и сила

поверхностного натяжения  $f$ , Н, должна быть, естественно, пропорциональна длине границы жидкости  $l$ , м:

$$f = \alpha l, \quad (43)$$

где  $\alpha$  - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Коэффициент  $\alpha$  (при тех же численных значениях) часто выражают через потенциальную энергию поверхностного слоя (Дж/м<sup>2</sup>), т.е.  $\alpha$  численно равен изменению потенциальной энергии поверхностного слоя жидкости при изменении ее площади на единицу.

На границе соприкосновения жидкости с твердым телом возможны два случая искривления ее поверхности. Когда молекулы жидкости взаимодействуют со стенками сосуда сильнее, чем между собой, края жидкости поднимаются вверх (как бы тянутся по стенке) и образуется вогнутый мениск. Это – смачивание, характеризующееся острым углом  $\theta \leq \frac{\pi}{2}$ , называемым краевым углом смачивания (углом, под которым жидкость располагается к твердому телу). При слабом взаимодействии молекул жидкости со стенками сосуда образуется выпуклый мениск при значениях  $\theta$  от  $\frac{\pi}{2}$  до  $\pi$ .

За счет сил поверхностного натяжения (поверхность стремится сократиться) появляется избыточное давление – положительное при выпуклом мениске и отрицательное при вогнутом.

Отрицательное давление, называемое иногда капиллярным натяжением, приводит к повышению уровня

жидкости, что особенно заметно именно в капиллярах (сосудах небольшого диаметра).

Следует отметить, что пропитывающие жидкости по отношению к древесине практически всегда являются смачивающими.

Если принять форму мениска частью сферы, то в цилиндрическом капилляре радиуса  $r$ , м, капиллярное давление  $P_k$ , Н/м<sup>2</sup>, определяется выражением

$$P_k = \frac{2\alpha \cos \theta}{r}. \quad (44)$$

Подъем жидкости в капилляре прекращается, когда капиллярное давление становится равным по абсолютной величине гидростатическому давлению столба жидкости в капилляре радиуса  $r$ , м:

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{r\rho g}, \quad (45)$$

где  $h$  - высота подъема жидкости в капилляре, м;

$\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>.

Если образец древесины, ось которого ориентирована вдоль волокон и влажность не превышает предела насыщения клеточных стенок, одной гранью опущен в смачивающую жидкость, то выделенный из этого образца один ряд проводящих анатомических элементов древесины (трахеид или сосудов) можно представить в виде перемежающихся макро- и микрокапилляров раз-



личного радиуса. Как показывают расчеты, в древесине высота подъема по капиллярам не превышает 1 м, а скорость движения жидкости по капиллярам колеблется вдоль волокон 30-150 мм и поперек волокон 0,2-3 мм в сутки.

В процессах пропитки, если сортимент полностью погружен в жидкость, ее перемещение по капиллярам происходит со всех сторон и действие силы тяжести слабо влияет на перемещение. Однако капиллярному давлению будет противодействовать давление защемленного внутри древесины воздуха, и расчетная глубина пропитки оказывается всего лишь в пределах 2-5 % толщины сортимента.

По этой причине для ускорения пропитки за счет капиллярного движения жидкости приходится применять дополнительное внешнее давление (пропитка в автоклавах). Очень интересной представляется возможность использования капиллярного давления жидкости для пропитки древесины на корню.

В растущих деревьях высота подъема свободной воды вверх по стволу в отдельных случаях достигает 150 м (например, эвкалипт у лиственных и секвойядендрон гигантский у хвойных). Расчеты показывают, что одно лишь капиллярное давление в сосудах и трахеидах не способно поднять воду на такую высоту. Здесь наиболее вероятным представляется наличие дополни-

тельных к капиллярному давлению двух «концевых двигателей» переноса. Во-первых, это корневое давление, нагнетающее воду вверх за счет осмотического давления и, во-вторых, транспирация, при которой испарение воды листьями вызывает ее подсос вверх по стволу в непрерывных нитях воды между обоими «концевыми двигателями».

При пропитке древесины на корню в стволе растущего дерева подрубается заболонь и к месту подруба подается водный раствор пропиточного вещества. Этот раствор занимает место поднимающегося по стволу и испаряющегося древесного сока. Как видно, собственно технология пропитки достаточно проста, однако существенным недостатком является некоторая неравномерность распределения пропитывающего вещества по объему ствола, что ограничивает практическое использование этого метода.

## ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

**Электростатика. Электрический ток.** Электрические свойства являются определяющими для таких видов продукции из древесины, как шпалы, опоры линий электропередач, а также широко используются для контроля влажности сортиментов и изделий, технологических процессов сушки, отделки, склеивания древесины и древесных материалов.

Сухая древесина – ярко выраженный диэлектрик. Об этом свидетельствуют прежде всего величины удельного объемного и поверхностного сопротивления прохождению электрического тока.

Методы измерения сопротивления, общие для всех материалов, основаны на законе Ома:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (46)$$

где  $R$  - сопротивление образца, Ом;

$U$  - напряжение, В;

$I$  - сила тока, А.

Удельное сопротивление  $\rho$  связано с  $R$  соотношением

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (47)$$

где  $l$  - длина образца, м;

$S$  - площадь, м<sup>2</sup>.

В зависимости от прохождения тока – по объему или по поверхности – определяются величины объемного и поверхностного удельного сопротивления, размерность  $\rho$  составляет Ом·м или Ом, часто пользуются и внесистемными единицами Ом·см.

При некотором различии удельного сопротивления вдоль и поперек волокон порядок величин  $\rho$  для сухой древесины характерен для диэлектриков. Так, удельное объемное сопротивление березы вдоль волокон

$2,3 \cdot 10^{16}$  Ом·см, поперек волокон  $5,1 \cdot 10^{16}$  Ом·см; у осины соответственно  $8 \cdot 10^{16}$  и  $1,7 \cdot 10^{16}$  Ом·см.

Типична для диэлектриков температурная зависимость электросопротивления древесины: при повышении температуры сопротивление падает в полном соответствии с положениями зонной теории твердого тела об увеличении числа носителей тока у диэлектриков и полупроводников. Так, повышение температуры сухой древесины с 20 до 94 °С уменьшает ее сопротивление почти в  $10^6$  раз.

Влага в древесине снижает ее электросопротивление, причем особенно это проявляется при увеличении содержания связанной воды от абсолютно сухого состояния до предела насыщения клеточных стенок. Удельное сопротивление в этом диапазоне изменения влажности снижается на 8-10 порядков. Экспериментально установлено, что электросопротивление древесины связано с влажностью обратной логарифмической зависимостью. Это позволяет широко использовать измерения электросопротивления для экспресс-метода определения влажности кондуктометрическими влагомерами, несмотря на локальность метода и его относительно высокую погрешность.

Важным параметром для диэлектриков является безразмерная величина  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость. Формально  $\varepsilon$  показывает, во сколько раз сила взаимодействия между электродами в

диэлектрической среде меньше, чем в вакууме. Так, в законе Кулона сила  $F$ , Н, взаимодействия точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , Кл, расположенных на расстоянии  $r$ , м, друг от друга,

$$F = \frac{q_1 q_2}{4 \pi \epsilon_0 \epsilon r^2}, \quad (48)$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{В} \cdot \text{м}}$  («электрическая постоянная»).

Величина  $\epsilon \geq 1$ , причем  $\epsilon = 1$  для вакуума (воздуха), а, например, для воды  $\epsilon = 81$ .

Физическая сущность  $\epsilon$  объясняется спецификой поведения диэлектриков в электрическом поле.

У диэлектриков с полярными молекулами (полярных диэлектриков), к которым относится и основной структурный элемент древесины – целлюлоза, электроны расположены несимметрично относительно атомных ядер. В таких молекулах «центры тяжести» положительных и отрицательных зарядов даже в отсутствии внешнего электрического поля не совпадают. Полярная молекула по своим электрическим свойствам подобна жесткому диполю с постоянным по модулю электрическим моментом

$$\vec{P}_l = q \vec{l}, \quad (49)$$

где  $P_l$  - электрический момент диполя, Кл·м;

$q$  - заряд, Кл;

$l$  - расстояние между зарядами («плечо диполя»),

м.

В отсутствии внешнего электрического поля векторы дипольных моментов молекул ориентированы беспорядочно, поэтому сумма дипольных моментов всех молекул, содержащихся в любом макроскопическом малом объеме  $\Delta V$  (м<sup>3</sup>) диэлектрика, равна нулю. При вынесении диэлектрика во внешнее поле происходит поляризация диэлектрика – суммарный дипольный электрический момент молекул в единице объема («поляризованность») становится отличным от нуля. Внешнее электрическое поле стремится ориентировать жесткие диполи полярных молекул по направлению вектора напряженности поля, этому препятствует хаотическое тепловое движение молекул, вызывающее разброс диполей. В итоге совместного действия поля и теплового движения происходит преимущественная ориентация дипольных электрических моментов вдоль поля, возрастающая с увеличением напряженности поля и с уменьшением температуры, причем вектор поляризованности  $\vec{P}$  направлен противоположно напряженности внешнего поля.

Пропорциональность поляризованности напряженности внешнего поля выражается в виде

$$P = \chi \epsilon_0 E, \quad (50)$$

где  $P$  - поляризованность (вектор поляризации в единице объема), Кл/м<sup>2</sup>;

$E$  - напряженность поля, В/м;

$\chi$  - безразмерный коэффициент пропорциональности.

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  оказывается равной

$$\varepsilon = 1 + \chi . \quad (51)$$

Таким образом, величина  $\varepsilon$  показывает, насколько легко поляризуется диэлектрик, ослабляя при этом за счет поляризации действие внешнего поля.

Диэлектрическая проницаемость древесины находится в пределах от 2 до 9 (увеличивается с ростом влажности); вдоль волокон величина  $\varepsilon$  в 1,5-2 раза выше, чем поперек волокон.

Поскольку поляризация связана с движением молекул, часть энергии внешнего поля неизбежно рассеивается в виде тепла («диэлектрические потери»). Тепловыделение возрастает с повышением плотности материала и с увеличением частоты переменного электрического поля. Поэтому древесина, помещенная между пластинами конденсатора высокочастотного колебательного контура, интенсивно нагревается.

Диэлектрический нагрев в области СВЧ (при частотах 5 МГц и выше) применяется для склеивания и сушки древесины. При склеивании массивной древесины диэлектрический нагрев позволяет быстро прогреть клеевые швы, что практически невозможно при контактом нагреве.

При диэлектрической сушке температура повышается по всему объему одновременно, увеличивается

скорость сушки, перепады влажности по сечению сортиментов сравнительно невелики, что позволяет избежать возникновения значительных термических напряжений и растрескивания. Этот способ применяют для сушки толстых пиломатериалов ценных пород, хотя стоимость сушки довольно высока из-за сравнительно небольшого коэффициента полезного действия высокочастотных генераторов (менее 0,65). Поэтому для экономии электроэнергии применяют комбинированный способ (камерно-диэлектрическую сушку), при котором расход тепла на удаление влаги компенсируется не только за счет высокочастотной электрической энергии, но и, как в конвективных сушилках, за счет энергии паровоздушной среды, нагретой в калориферах.

**Индукционные токи.** Электрическое и магнитное поля взаимосвязаны. Одним из фундаментальных законов, основанных на этой взаимосвязи, является закон электромагнитной индукции Фарадея – в замкнутом контуре возникает э.д.с.  $\varepsilon_i$ , В, электромагнитной индукции, которая численно равна и противоположна по знаку скорости изменения потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\varepsilon_i = \frac{d\Phi}{dt}, \quad (52)$$

где  $\Phi$  - магнитный поток, В·с;

$t$  - время, с.



Индукционные токи возникают в постоянном магнитном поле при движении проводника или же в неподвижных проводниках в переменном магнитном поле, поскольку такое поле, как показал Максвелл, возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле, являющееся причиной возникновения индукционного тока.

Индукционные токи возникают не только в линейных, но и в массивных сплошных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле. Эти токи оказываются замкнутыми в толще проводника и называются вихревыми токами (токами Фуко).

Джоулево тепло, выделяемое индукционными токами, используется при индукционной сушке пиломатериалов. Штабель с уложенными между рядами пиломатериалов ферромагнитными элементами в виде сеток из мягкой полосовой стали помещают в электромагнитное поле промышленной частоты 50 Гц, образованное во внешнем по отношению к штабелю соленоиде. Соленоид монтируется внутри сушильной камеры из проводников больших сечений. Ферромагнитные элементы нагреваются индуктивными токами и передают тепло древесине путем непосредственного контакта и путем конвекции от циркулирующего воздуха.

Продолжительность индукционной сушки примерно в 1,5-2 раза меньше камерной, а себестоимость такая же, как и при диэлектрической сушке, т.е. вдвое выше камерной.

Поскольку при индукционной сушке наблюдаются некоторая неравномерность просыхания материала и местные перегревы, такой вид сушки используется, главным образом, на небольших предприятиях, испытывающих затруднения с пароснабжением, и как правило, для не слишком ответственных видов пиломатериалов.

## ОПТИКА, АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

**Электромагнитные волны. Корпускулярно-волновой дуализм света.** Взаимосвязь магнитных и электрических полей проявляется, в частности, в эффекте электромагнитной индукции. Однако наиболее полно эта взаимосвязь выражена в факте существования электромагнитных волн – переменного электромагнитного поля, распространяющегося в пространстве с конечной скоростью. Наличие электромагнитных волн вытекает из теории Максвелла, сформулированной на основе обобщения законов электрических и магнитных явлений.

Поскольку напряженность  $H$ , А/м, магнитного поля, возникающего в результате изменения поля электрического, пропорциональна скорости изменения напряженности  $E$ , В/м, электрического поля

$$H \approx \frac{dE}{dt}, \quad (53)$$

а напряженность  $E$  электрического поля, возникающего в результате изменения магнитного поля, пропорциональна скорости изменения напряженности магнитного поля

$$E \approx \frac{dH}{dt}, \quad (54)$$

отсюда следует, что переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле и наоборот. Если в какой-либо точке пространства возбудить вихревое электрическое поле, то в окружающем заряды пространстве возникает последовательность взаимных превращений электрических и магнитных полей, т.е. возникает переменное электрическое поле, распространяющееся во времени и пространстве. Этот процесс является периодическим и представляет собой электромагнитную волну.

Следствием теории Максвелла является поперечность электромагнитных волн: векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  напряженностей электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны и лежат в плоскостях, перпендикулярных вектору скорости распространения волны. Кроме того, векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  всегда колеблются в одинаковых фазах, т.е. они одновременно достигают максимума, одновременно обращаются в нуль и т.д.

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме  $c=3 \cdot 10^8$  м/с, а энергия электромагнитного по-

ля  $W$  складывается из энергий электрического  $W_e$  и магнитного  $W_m$  полей:  $W=W_e+W_m$ .

Общая физическая природа различных электромагнитных волн, возникающих при появлении переменных электрических и магнитных полей, следует из теории Максвелла и была экспериментально подтверждена Герцем, установившим, в частности, идентичность природы электромагнитного излучения и видимого света. Таким образом, весь спектр электромагнитного излучения от радиоволн до гамма-излучения имеет одну природу, волны распространяются с одинаковой скоростью, а отличие волн различных участков спектра – только в длине волны  $\lambda$ , м:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (55)$$

где  $c=3 \cdot 10^8$  м/с - скорость волн в вакууме;

$\nu$  - частота излучения,  $\text{с}^{-1}$  (Гц).

Названия для излучений, лежащих в различных участках спектра, сложились исторически – они просто дают удобную классификацию источников излучения. Области с тем или иным названием не имеют четко выраженной границы и перекрываются, однако названия все же связаны с определенными источниками возбуждения электромагнитных волн.

Радиоволны, УКВ- и СВЧ- излучение (длины волн  $\lambda$  в пределах  $10^3 - 10^{-5}$  м) создаются электронами, движущимися в проводниках.

Инфракрасное излучение ( $\lambda$  от  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $8 \cdot 10^{-7}$  м), видимый свет ( $\lambda$  от  $8 \cdot 10^{-7}$  до  $4 \cdot 10^{-7}$  м), ультрафиолетовое излучение ( $\lambda$  от  $4 \cdot 10^{-7}$  до  $10^{-9}$  м) возникают при тепловом излучении в результате перехода электронов на более низкие энергетические уровни (ультрафиолетовое излучение возбуждается также при газовых и электродуговых разрядах).

Рентгеновское излучение ( $\lambda$  от  $2 \cdot 10^{-9}$  до  $6 \cdot 10^{-12}$  м) создается электронами, ударяющимися об антикатод; наконец, гамма-излучение ( $\lambda$  менее  $6 \cdot 10^{-12}$  м) возникает при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, а также в результате процессов, связанных с образованием и развитием космических объектов.

Необходимо отметить, что практически во всем диапазоне электромагнитного спектра возможно создание индуцированного, или вынужденного, излучения высокой степени монохроматичности и когерентности (постоянная разность фаз в пространстве) – лазерного излучения.

При распространении электромагнитных волн могут происходить явления, характерные для всех волновых процессов. Это отражение волн, интерференция (наложение двух или нескольких когерентных волн с перераспределением энергии волн в пространстве), дифракция (нарушение целостности волновой поверхности в среде с резкими неоднородностями, иначе – отклонение от прямолинейности распространения волн,

например, вблизи края экрана), поляризация (выделение одной плоскости колебаний в случае поперечных волн).

Вместе с тем ряд особенностей электромагнитного излучения не может быть описан закономерностями волновых процессов. Это относится к экспериментальной зависимости спектральной плотности энергетической светимости теплового излучения (в области малых длин волн), к выбиванию светом электронов с поверхности твердых тел (фотоэффект), к процессам фотоионизации атомов и молекул. Эти и некоторые другие эффекты (например, эффект Комптона – уменьшение длины рассеянных рентгеновских лучей) получили объяснение в рамках квантовой гипотезы электромагнитного излучения М. Планка: электромагнитные волны излучаются не непрерывно, а отдельными порциями, квантами, энергия которых зависит от длины волны (частоты):

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (56)$$

где  $\varepsilon$  - энергия кванта электромагнитного излучения, Дж;

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка;

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость волны в вакууме;

$\nu$  - частота излучения,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\lambda$  - длина электромагнитной волны, м.

Квантовые свойства электромагнитных волн проявляются не только при излучении, но и при их поглощении, что было показано А. Эйнштейном на примере фотоэффекта. При этом квант может быть представлен как своеобразная частица («фотон»), обладающая массой и импульсом и существующая в то же время только при движении со скоростью света.

Противопоставление волновых и квантовых свойств света (под светом понимается весь диапазон электромагнитных волн) ошибочно. Свойства непрерывности, характерные для электромагнитного поля волны, не исключают свойств дискретности, характерных для квантов-фотонов: свет одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и свойствами дискретных фотонов. Однако в проявлении этих противоположных свойств имеется вполне определенная закономерность: с уменьшением длины волны (увеличение частоты) все более отчетливо сказываются квантовые свойства света. С этим связано, например, существование красной границы фотоэффекта и фотохимических реакций. Вместе с тем волновые свойства коротковолнового излучения, например, рентгеновского и тем более гамма излучения, выражаются относительно слабо.

Корпускулярные (квантовые) и волновые свойства света не исключают, а взаимно дополняют друг друга. Они отражают две различные, но в то же время тесно

взаимосвязанные закономерности распространения электромагнитного излучения и его взаимодействия с веществом. Корпускулярные свойства обусловлены тем, что энергия и импульс излучения локализованы в дискретных «частицах» – фотонах, волновые – статистическими закономерностями распределения фотонов в пространстве, т.е. закономерностями, определяющими плотность вероятности попадания фотонов в различные точки пространства.

При воздействии на древесину различных длинноволновых электромагнитных излучений и в какой-то мере коротковолнового рентгеновского излучения существенного изменения ее физико-химических и механических свойств практически не происходит. Однако способность древесины пропускать, отражать и поглощать электромагнитные волны находит достаточно широкое применение главным образом для контроля качества и выявления пороков.

Электромагнитные волны инфракрасной части спектра поглощаются древесиной в относительно тонких поверхностных слоях в пределах 3-5 мм. В то же время повышение влажности древесины увеличивает ее проницаемость для инфракрасного излучения, поскольку коэффициенты отражения воды в десятки раз меньше, чем древесины. Это дает возможность измерять влажность поверхностных зон массивной древесины и влажность древесных частиц в производстве дре-



весно-стружечных плит, тем более, что насыпная плотность частиц древесины не влияет на результаты измерения влажности.

Инфракрасное излучение используется и непосредственно в технологических операциях, связанных с нагревом поверхностных слоев древесины, например, перед склеиванием поверхностей, а также для сушки тонкослойной древесины (шпон, щепка, стружка) и сушки лакокрасочных покрытий.

Следует отметить, что расчет величины мощности инфракрасного теплообмена основан на законе Стефана-Больцмана и выражается достаточно простым соотношением

$$Q = \sigma F_p \alpha \cos \varphi (T_1^4 - T_2^4), \quad (57)$$

где  $Q$  - тепловая мощность, Вт;

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad - \quad \text{коэффициент Стефана-}$$

Больцмана;

$F_p$  - расчетная поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;

$\alpha$  - приведенный коэффициент степени черноты (безразмерная величина, численно равная поглощательной способности тела);

$\varphi$  - угол падения потока ИК-излучения;

$T_1$  и  $T_2$  - температуры нагревателя и нагреваемой поверхности, К.

В случае теплообмена между параллельными плоскостями  $\cos\varphi=1$ , а  $F_p \approx F$ , где  $F$  – фактическая поверхность.

Электромагнитное излучение видимой части спектра используется для оптического метода контроля древесины и изделий из древесины. Оптическая дефектоскопия древесины основана на различной способности ее отдельных участков отражать световой поток и на различии их оптических плотностей. Поэтому информативной оказывается разность световых потоков, отраженных от здоровой древесины и локальных дефектных участков, а также разность световых потоков, прошедших через порок и здоровый участок древесины.

Относительная простота метода, его безопасность, возможность использования недорогих источников света (как правило, зеркальные рефлекторы с лампами накаливания) и высокочастотных фотоприемников (фотоэлектронные умножители и полупроводниковые фотодиоды), обеспечивающих погрешность измерения в пределах 5-10 %, позволяют успешно использовать оптический метод для выявления самых разнообразных пороков древесины. Практически полностью выявляются дефекты механической обработки, сучки, трещины, кармашки, засмолки и водослой; частично выявляются сердцевина, гниль, синева, червоточины, заполненные трухой, прорость.

Весьма эффективным оказывается применение оптического метода для обнаружения дефектов склеивания фанеры. В данном случае используется регистрация проходящего светового потока на образцах толщиной до 35 мм, при этом дефекты выявляются по темным локальным участкам.

Применение более коротковолнового электромагнитного излучения – ультрафиолетового – имеет свои особенности, связанные с тем, что ультрафиолетовые лучи способны вызывать люминесценцию. Взаимодействие квантов ультрафиолета с атомами и молекулами вещества приводит к переходу электронов на более высокие энергетические уровни (для диэлектриков, к которым относятся структурные компоненты древесины, это акцепторные локальные уровни в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости). Обратные переходы электронов сопровождаются испусканием более длинных электромагнитных волн видимой части спектра, которое происходит либо только в процессе воздействия ультрафиолетового излучения (флуоресценция), либо и спустя некоторое время после этого воздействия (фосфоресценция).

Древесина большинства пород способна флуоресцировать в ультрафиолетовом свете. Поскольку отдельные элементы древесины и прежде всего ее пороки (табачные сучки, синева, гнили и пр.) в значительной степени отличаются по физической структуре и химиче-

скому составу, эти отличия достаточно четко проявляются в интенсивности и цветовом спектре люминесценции. Помимо решения задач дефектоскопии, использование ультрафиолетовой флюоресценции весьма перспективно для определения породы древесины.

Электромагнитное излучение рентгеновского диапазона традиционно используется для рентгеноструктурного анализа отдельных компонентов древесины (целлюлозы и гемицеллюлоз), для подсчета годовых колец в дендрологических исследованиях (как в лабораторных, так и в полевых условиях), для выявления скрытых пороков древесины. Относительно большая проникающая способность рентгеновских лучей позволяет применять их не только для тонких пиломатериалов, но и для просвечивания крупных круглых лесоматериалов, хлыстов, при этом можно обнаружить заросшие сучки, червоточины, внутренние трещины, ядровую гниль, инородные включения. Рентгеновские лучи в принципе можно использовать для определения величины и характера распределения влаги по сечению, так как вода снижает их проницаемость.

Следует иметь в виду, что рентгеновское излучение, особенно коротковолновое – «жесткий рентген» – относится к ионизирующим и представляет опасность для здоровья персонала. Поэтому использование этого вида электромагнитного излучения предусматривает соответствующую защиту.

Ослабление ионизирующего излучения защитным материалом происходит по экспоненциальному закону

$$J=J_0\exp(-\mu x) , \quad (58)$$

где  $J_0$  и  $J$  - соответственно интенсивность, Вт/м, пучка, падающего на материал и дошедшего до глубины  $x$ , м;

$\mu$  - линейный коэффициент ослабления, м<sup>-1</sup>.

Сама по себе древесина не обеспечивает защиты от ионизирующих излучений. Так, линейный коэффициент ослабления для сухой древесины составляет лишь 0,2-0,08 1/см при энергии излучения 20-100 КэВ. Вместе с тем, как показали исследования, выполненные на кафедре механической обработки древесины УГЛТУ, на основе древесины возможно создание композиционного материала, обладающего эффективными защитными свойствами от рентгеновского излучения. В качестве несущей основы используется лущеный шпон, а защитными и одновременно связующими слоями является легкоплавкий (температура плавления 68 °С) сплав Вуда. Как показали производственные испытания, подобный материал может успешно конкурировать с более дорогими защитными материалами на основе свинца, такими как просвинцованная резина, имея при этом более высокие конструкционно-эксплуатационные и декоративные свойства.

**Элементы ядерной физики.** Ядро атома любого химического элемента состоит из нуклонов: двух видов элементарных частиц – протонов и нейтронов. Протоны

имеют положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона, нейтроны электрически нейтральны. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона, масса нейтрона больше массы протона на 2,5 массы электрона.

Количество протонов  $Z$  определяет заряд ядра  $+Ze$  ( $e$  – заряд электрона) и совпадает с атомным номером соответствующего химического элемента в периодической системе Менделеева. Количество нейтронов  $N$  вместе с количеством протонов  $Z$  определяют массовое число ядра (общее число нуклонов)  $A=N+Z$ . Обозначение символов атома элемента и ядра одинаково:  $X_Z^A$ . Для всех ядер  $A \geq Z$ , ядра, имеющие один и тот же  $Z$  при различных  $A$  являются изотопами, т.е. изотопы ядер химического элемента имеют разное число нейтронов в составе ядра.

Между составляющими ядро нуклонами действуют специфические для ядра силы притяжения (ядерные силы), значительно превышающие кулоновские силы отталкивания между протонами. Особенности ядерных сил являются их короткодействие (расстояние не более  $10^{-15}$  м), зарядовая независимость (одинаковы для любых нуклонов), способность к насыщению, т.е. каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов.

Сложный характер ядерных сил и трудность точного описания всех нуклонов ядра (ядро с массовым чис-

лом  $A$  представляет собой систему из  $A$  тел) не позволили до настоящего времени разработать единую последовательную теорию атомного ядра, хотя существующие модели ядра (капельная, оболочечная, обобщенная) в принципе объясняют особенности поведения нуклонов и основные ядерные превращения.

Одним из фундаментальных понятий ядерной физики является радиоактивность – способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений и элементарных частиц. Радиоактивность подразделяется на естественную (наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе) и искусственную (наблюдается у изотопов, полученных посредством ядерных реакций). Принципиального различия между этими двумя типами радиоактивности нет, так как законы радиоактивного превращения в обоих случаях одинаковы.

Радиоактивное излучение бывает трех типов:  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучение.

$\alpha$ -излучение представляет собой поток ядер гелия  $He_2^4$ , скорости вылета  $\alpha$ -частиц из ядра имеют порядок  $10^7$  м/с. Двигаясь в веществе,  $\alpha$ -частицы производят ионизацию атомов или молекул вещества, теряя при этом энергию и образуя на своем пути около  $10^5$  пар ионов.

В то же время пробег  $\alpha$ -частицы (расстояние, на котором она производит ионизацию) невелик: в воздухе – порядка  $10^{-2}$  м, а в жидкостях и твердых телах – порядка  $10^{-5}$  –  $10^{-6}$  м.

$\beta$ -излучение является потоком быстрых (скорости порядка  $10^7$  м/с) электронов, возникающих в ядре при протон-нейтронном превращении. При меньшей, чем у  $\alpha$ -частиц ионизации, пробег  $\beta$ -частиц выше на порядок (около  $10^{-2}$  –  $10^{-3}$  м в твердых телах).

$\gamma$ -излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны (менее  $10^{-10}$  м), т.е. оно обладает ярко выраженными квантовыми (корпускулярными) свойствами и, по сути, является потоком  $\gamma$ -квантов. При относительно слабой по сравнению с  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучением способности ионизировать атомы и молекулы вещества  $\gamma$ -кванты имеют максимальную из всех видов радиоактивных излучений проникающую способность, например, они проходят через слой свинца толщиной 5 см.

Экспериментально установлено, что  $\gamma$ -излучение не является самостоятельным видом радиоактивности, а только сопровождает  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады и также возникает при ядерных реакциях, торможении заряженных частиц, их распаде и т.д., т.е. испускание  $\gamma$ -кванта происходит при переходе ядра из возбужденного состояния в основное (равновесное) состояние.



Энергия  $\gamma$ -квантов при радиоактивных распадах различных ядер обычно находится в пределах от 10 кэВ до 5 МэВ. Высокая проникающая способность  $\gamma$ -излучения позволяет производить дефектоскопию массивных древесных образцов. В частности, портативные гамма-дефектоскопы, использующие изотопы цезий-137 или тулий-170, дают возможность установить местоположение напенных и стволовых гнилей и производить оптимальный раскрой хлыста. Поскольку в перестойных лесах каждое второе-третье дерево поражено напенной или стволовой гнилью, наибольшие потери при разделке вызваны именно этими двумя видами пороков. Применение гамма-дефектоскопии может повысить общий выход деловой древесины до 7 % и соответственно увеличить выход высокосортных пиломатериалов.

Взаимодействие  $\gamma$ -излучения с древесиной в зависимости от энергии  $\gamma$ -кванта и дозы облучения может приводить к изменению ее физико-механических свойств, причем в достаточно широком диапазоне. Это происходит за счет разрыва имеющихся и создания новых электронных связей, образования свободных радикалов, изменения степени кристалличности целлюлозы и гемицеллюлоз вплоть до их радиолиза (разложения полимеров под действием радиации).

При небольших дозах облучения в несколько грей (1 Гр (грей) соответствует 1 Дж/кг) меняется цвет древесины: по всему объему древесина приобретает бурую

окраску. При облучении дозой в 10 Гр наблюдается даже небольшой рост прочности древесины (на 10 - 15 %). При дозах порядка 0,1 МГр и выше происходит снижение механических свойств, причем более всего снижается сопротивление статическому изгибу и ударная вязкость (после облучения дозой в 0,5 МГр ударная вязкость снижается более чем в 2 раза).

Представляет интерес биологический аспект действия  $\gamma$ -радиации на древесину. Так, облучение дозой в 10 Гр приводит к деструкции грибов-разрушителей древесины, а доза  $10^3$  Гр является смертельной для насекомых. При облучении дозой  $10^4$  Гр можно добиться полной стерилизации древесины. При облучении дозой  $10^5$  Гр древесина становится доступной для пищеварительных энзимов животных. Древесина, обработанная дозой в 1 МГр, практически полностью теряет прочность и может растворяться в воде.

Радиоактивные свойства любого элемента обусловлены только структурой его ядра, поэтому на характер радиации не влияет вид химического соединения, в котором находится активный элемент, его агрегатное состояние, а также внешние факторы (давление, температура, электрические и магнитные поля). В связи с этим обстоятельством, начиная с 70-х годов прошлого века, были проведены обширные исследования конструкционных и строительных материалов на наличие естественных источников радиации. Выяснилось, что наи-

более безопасным материалом является древесина, имеющая крайне низкое содержание самых распространенных радиоактивных изотопов радона-220, цезия-137 и стронция-90. Средняя удельная радиоактивность древесины примерно в 30 раз ниже, чем у самых «чистых» песка, гравия, природного гипса и в сотни раз ниже, чем у гранитов, глиноземов, угольных шлаков. Даже древесина из зоны аварии Чернобыльской АЭС может быть использована, поскольку превышающие санитарные нормы активности концентрации цезия-137 сосредоточены в коре и ветвях, а пиломатериалы получают из древесины ствола.

## **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

### **Раздел «Механика»**

Попробуйте дать свое определение древесины как материала.

Что такое сила и в чем заключается принцип независимости действия сил?

Какие силы называются консервативными?

В чем различие между понятиями энергии и работы?

Какова роль момента инерции во вращательном движении?

От чего зависит амплитуда и начальная фаза гармонических механических колебаний?

Каков физический смысл коэффициента затухания колебаний?

Почему при дефектоскопии используются именно ультразвуковые колебания?

Резонансные свойства древесины ухудшаются с ростом ее влажности. Почему же около фортепиано рекомендуют ставить открытые емкости с водой?

Как объяснить распространение колебаний в упругой среде? Как возникают продольные и поперечные волны?

### **Раздел «Молекулярная физика и термодинамика»**

Что такое термодинамические параметры?

Запишите уравнение Ван-дер-Ваальса для произвольного количества молей реального газа.

В чем сущность явлений переноса и при каких условиях они возникают?

Почему закономерности всех явлений переноса сходны между собой?

Попытайтесь объяснить снижение поверхностного натяжения у всех жидкостей с ростом температуры.

При каких условиях жидкость смачивает твердое тело и при каких не смачивает?

От чего зависит высота поднятия смачивающей жидкости в капилляре?

### **Раздел «Электромагнетизм»**

Вспомните, как записывается закон Ома для неоднородного участка цепи и для замкнутой цепи, а также закон Ома в дифференцированной форме.

Каков физический смысл относительной диэлектрической проницаемости?

Каким образом влияют влажность и температура на электросопротивление древесины?

Как зависит относительная диэлектрическая проницаемость от влажности и температуры?

Попробуйте записать выражения для работы и мощности электрического тока.

### **Раздел «Оптика, атомная и ядерная физика»**

Что такое электромагнитная волна и какова скорость ее распространения?

Как можно представить себе шкалу электромагнитных волн и каковы источники излучения разных видов волн?

В чем заключается корпускулярно-волновой дуализм электромагнитного излучения?

В чем особенность ядерных сил?

Почему прочность ядер уменьшается при переходе к тяжелым элементам?

Что понимается под радиоактивностью?

Как влияют различные виды радиоактивного излучения на свойства древесины?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

### Основная литература

1. Детлаф, А.А., Курс физики [Текст]: учебник для вузов/ А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высш. шк., 1999. - 718 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст]: учебник для вузов/Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 1994. - 542 с.
3. Дмитриева, В.Ф. Основы физики [Текст]: учебник для вузов/ В.Ф. Дмитриева, В.Л. Прокофьев.– М.: Высш. шк., 2001. - 521 с.
4. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения [Текст]: учебник для вузов/Б.Н. Уголев. – изд 3-е, перераб. и доп. - М.: МГУЛ, 2002. - 340 с.
5. Швамм Е.Е. Древесиноведение [Текст]: учеб. пособие/ Е.Е. Швамм. – Екатеринбург: «БРИЗ-Урал», 2001. - 205 с.
6. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины [Текст]: учебник для вузов/ П.С. Серговский, А.И. Расев. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 360 с.
7. Кречетов, И.В. Сушка и защита древесины [Текст]: учеб. пособие/ И.В. Кречетов. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 550 с.
8. Кармадонов, А.Н. Дефектоскопия древесины [Текст]: моногр. /А.Н. Кармадонов. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 120 с.

Дополнительная литература

1. Никитин, Н.И. Химия древесины и целлюлозы [Текст]: моногр. /Н.И. Никитин. – М.;Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – 711 с.
2. Перепечко, Н.И. Введение в физику полимеров [Текст]: моногр. / Н.И. Перепечко. – М.: Химия, 1978. - 312 с.
3. Чудинов, Б.С. Вода в древесине [Текст]: моногр./ Б.С. Чудинов. – Новосибирск: Наука, 1984. - 270 с.
4. Перелыгин, А.М. Древесиноведение [Текст]: учебник для вузов/ А.М. Перелыгин. - М.: Лесн. пром-сть, 1969. – 318 с.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
Особенности строения древесины . . . . .	4
Механика . . . . .	9
Молекулярная физика и термодинамика . . . . .	31
Электромагнетизм . . . . .	49
Оптика, атомная и ядерная физика . . . . .	57
Вопросы для самоконтроля . . . . .	74
Рекомендуемая литература . . . . .	78

Учебное издание

Владимир Иванович Крюк  
Елена Евгеньевна Швамм

**ФИЗИКА В ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИИ  
И ТЕХНОЛОГИИ ДРЕВЕСИНЫ**

**Лекции**

Редактор Е.Л. Михайлова  
Верстка Е.Е. Швамм

---

Подписано в печать	16.04.07	Формат	60x84 1/16
Бум. тип. №1	Печать офсетная	Уч.-изд. л.	2,55
Усл. печ. л.	4,65	Тираж	120 экз. Заказ

---

Уральский государственный лесотехнический университет  
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

Размножено с готового оригинал-макета  
ГУП СО "Талицкая типография"

623 640 Свердловская обл., г. Талица, ул. Исламова, 2