



КОНФЕРЕНЦИИ И СОВЕЩАНИЯ

УДК 061.3:630\*81

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ  
В ШВЕЙЦАРСКОЙ ВЫСШЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ШКОЛЕ ЦЮРИХА (ETHZ)**

© *Б. Н. Уголев<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.*

*Г.А. Горбачева<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.*

*П. Нимц<sup>2</sup>, проф., член Правления IAWS*

<sup>1</sup> Московский государственный университет леса, ул. 1-я Институтская, 1,  
г. Мытищи-5, Московская обл., Россия, 141005

E-mail: [ugolev@mgul.ac.ru](mailto:ugolev@mgul.ac.ru)

<sup>2</sup> Швейцарская высшая техническая школа ЦЮРИХА(ETHZ), Ремиштрассе, 101,  
г. Цюрих, Швейцария, 8092

Дальнейшее развитие древесиноведения в современных условиях невозможно без координации исследований, сотрудничества ученых, обмена научной информацией. Указанным целям отвечает деятельность Регионального координационного совета по современным проблемам древесиноведения (РКСД), функционирующего в МГУЛ под эгидой Международной академии наук о древесине (IAWS).

Наиболее эффективно работают коллективы, объединяющие усилия разных специалистов в том числе из зарубежных стран. Это позволяет использовать дорогостоящее уникальное научное оборудование и накопленный опыт для решения поставленных задач. Полезный обмен научной информацией, рождение новых идей и направлений исследований происходят при посещении учебных и исследовательских центров. Недавно состоялся визит в МГУЛ члена РКСД проф. П. Нимца. Незадолго до этого ученый секретарь РКСД доц. Г.А. Горбачева и асп. С.Ю. Белковский после конференции в Словакии посетили Швейцарскую высшую техническую школу Цюриха (ETHZ).

Член Правления IAWS проф. П. Нимц возглавляет отдел физики древесины Института строительных материалов ЕНТЗ – одного из старейших учебных и научных центров Европы. Институт ведет подготовку бакалавров, магистров и докторов философии по 16 специальностям.

В марте 2013 г. проф. П. Нимц был принят ректором МГУЛ и зав. кафедрой древесиноведения акад. IAWS проф. В.Г. Санаевым.

Проф. П. Нимц прочитал в МГУЛ цикл лекций. В *первой лекции* он рассказал о структуре института и основных научных направлениях руководимого им подразделения. В институте 5 отделов (исследовательских рабочих групп): физика и химия бетона, физика древесины, древесные материалы, вычислительная физика инженерных материалов, коррозия и долговечность.



Проф. П. Нимц во время визита в МГУЛ, 2013  
(слева направо: проф. П. Нимц, уч. секретарь РКСД  
Г.А. Горбачева, проректор МГУЛ В.В. Никитин, президент  
МГУЛ А.Н. Обливин, председатель РКСД Б.Н. Уголев,  
проректор МГУЛ В.И. Запруднов)

Области исследований отдела физики древесины: зависимости между строением и свойствами древесины и древесных материалов; компьютерное моделирование; неразрушающие испытания; соединения массивной древесины; тепло- и массообмен в древесине. Отдел располагает коллекцией пороков древесины; помещениями с регулируемой температурой и влажностью воздуха; климатическими камерами, машинами для механических испытаний с климатическими приставками, системой изображения корреляций, установками для измерения теплопроводности, шероховатости, ползучести, деформаций и давления разбухания древесины. Для проведения неразрушающих испытаний имеется ряд ультразвуковых приборов, установки для измерения собственной частоты колебаний, акустической эмиссии и т. д.

Исследования малых объектов из древесины осуществляются на установке для микромеханических испытаний; устройстве, использующем синхротронное излучение; электронном сканирующем микроскопе. Натурные испытания деревянных конструкций проводят в отдельном ангаре, атмосферостойкость – на полигоне. Отдел физики древесины сотрудничает с Институтом Пауля Шеррера в Виллегене (Швейцария), где находятся источники нейтронного и синхротронного излучения, Фраунгоферским институтом неразрушающих испытаний в Саарбрюкене (Германия) и другими научно-исследовательскими центрами.

Современное научное оборудование и кооперация позволяют проводить разнообразные исследования в области фундаментального и прикладного древесиноведения. Были приведены примеры тематики исследовательских про-

ектов, выполненных в последнее время для получения ученой степени доктора философии.

По проблеме связей между структурой и свойствами древесины:  
экспериментальная иерархическая характеристика древесины под влажностной и силовой нагрузкой (синергетический эффект);

ортотропность свойств древесины бука;

свойства старинной древесины из памятников культуры.

По связующим веществам:

зависимости между структурой и свойствами полиуретановых связующих для «инженерной древесины»;

проникновение адгезивов в древесину, фазовые изменения и разрушение клеевых слоев;

механика поведения клеевых соединений под воздействием окружающей среды;

расслоение клееной древесины лиственных пород.

По неразрушающим испытаниям:

разработка и экспериментальное применение оборудования для механических испытаний в режиме «in situ» при синхротронном томографировании миниатюризированных образцов древесины;

акустическая эмиссия и видео изображения корреляций для фанеры.

*Во второй лекции* проф. П. Нимц представил обзор неразрушающих методов испытаний (НМИ) древесины и древесных изделий. Акцент был сделан на методы контроля состояния древесины при ее старении в изделиях, конструкциях, памятниках культуры. Для этой цели используют современные сенсорные системы. Наиболее широко НМИ применяются для контроля качества продукции в промышленности: на заводах древесностружечных и древесноволокнистых плит, фанеры, лесопильных заводах, при сортировке лесоматериалов.

Проблемы эффективного контроля качества древесины в процессе эксплуатации изделий и конструкций осложняются рядом обстоятельств. Неизвестно начальное качество древесины из-за высокой изменчивости основных его показателей (плотности, модуля упругости и предела прочности при изгибе). Происходит изменение цвета вследствие естественного старения. Наблюдаются колебания равновесной влажности. Влияют неоднородности микро-, субмикро- и наноструктуры (углов наклона волокон и микрофибрилл), недостаточно изучен сам механизм старения при длительной (200 лет и более) выдержке. Эти проблемы решаются при использовании неразрушающих методов контроля. При разработке НМИ используются различные особенности древесины.

По показателям механических свойств можно осуществлять классификацию лесоматериалов. Например, силовую сортировку пиломатериалов проводят, определяя модуль упругости. В основе методов сопротивления сверлению и проникновению лежат также механические свойства (твердость и др.).

По электрическому сопротивлению определяют влажность и грибные поражения древесины, по диэлектрическим свойствам – влажность, вызван-

ные сучками завитки, по пьезоэлектрическим свойствам – акустическую эмиссию.

Способность распространять звуковые волны позволяет по скорости звука и поглощению проводить сортировку пиломатериалов, определять пороки древесины (грибные поражения и трещины): по затуханию – трещины, по собственной частоте – модули упругости и сдвига.

Тепловые свойства используют, применяя термографию для определения сучков, расслоений, дефектов покрытий, распространяющихся на глубину до 5 мм.

Воздействие электромагнитных излучений (в том числе и лазерного) позволяет по отражению света определять качество поверхности древесины, наличие пороков; путем колориметрии характеризовать цвет, сучковатость и старение древесины, применяя ближнюю инфракрасную спектроскопию устанавливать влажность и содержание связующего; используя нейтронное излучение исследовать строение и распределение влажности древесины; методом ядерно-магнитного резонанса обнаруживать особенности распределения влажности; с помощью рентгеновских радаров определять плотность и распределение плотности древесины, малых углов наклона микрофибрилл.

Иногда целесообразно применение комплекса НМИ.

Для измерения влажности древесины на глубине до нескольких сантиметров используют электровлагомеры. Влажность поверхностных зон древесины толщиной 0,1...0,2 мм измеряют путем БИК-спектроскопии.

Метод кернов – цилиндрических образцов, высверливаемых полым возрастным буровым из ствола дерева, используется для определения наличия гнили, плотности древесины, проведения изгибных и других механических испытаний. Были приведены примеры применения механических видов НМИ для оценки качества древесины растущих деревьев, состояния кровельных и других строительных конструкций.

Большое внимание было уделено звуковым методам, основанным на измерении собственной частоты, для определения упругих констант древесины как ортотропного материала: модулей упругости и сдвига, коэффициентов Пуассона. Учет их при ультразвуковых испытаниях существенно увеличивает значения модулей упругости по сравнению с показателями, определенными при статических испытаниях. Изложен принцип определения пороков древесины звуковыми методами. Приведены зависимости трудно определяемого порока древесины при продольном сжатии от модуля упругости вдоль волокон. По снижению скорости звука контролируют процесс развития гнили, пульсирующим эхо-методом – трещины в клееной древесине. Проводят объемную ультразвуковую томографию стволов растущих деревьев. Толщину покрытий на древесине определяют ультразвуковым, электрическим и оптическими методами. Акустическую эмиссию используют для контроля за сушилными трещинами, повреждениями от насекомых и др.

Приведены примеры использования методов, основанных на воздействии излучений. Современные колориметрические методы применяли для

исследования изменений цвета древесины разных пород под действием солнечного света. С помощью видеокамеры измеряли деформации при механических испытаниях древесины методом изображения взаимных корреляций. Показано распределение деформаций в плитах МДФ при разных уровнях нагрузки. Получены графики изменения сушильных деформаций по годичным слоям в радиальном, тангенциальном и смешанном направлениях. Показано наличие тесной прямой связи между модулем упругости, предсказанным по данным БИК-спектроскопии, и действительным модулем упругости. Рассмотрены возможности применения рентгеновских лучей с разрешающей способностью 10 мкм, рентгеновской микротомографии (разрешение 2...5 мкм) и синхротронного излучения (разрешение 1 мкм) для определения плотности и ее распределения, сучков, гнилей, анализа структуры древесины, деформаций в клеточной стенке под нагрузкой. Применение излучений для НМИ основано на ослаблении интенсивности прошедшего через объект излучения.

Показаны возможности использования устройства Silvascan для измерения по дифракции и поглощению рентгеновских лучей, угла наклона микрофибрилл, плотности, толщины клеточных стенок, модуля упругости и размеров трахеид. Приведен пример распределения этих показателей по радиусу ствола ели и тиса. Показано изображение строения плиты ОСБ, полученное с помощью рентгеновского томографа с разрешением 10 мкм. Компьютерную томографию используют для определения состояния строительных конструкций и древесины растущих деревьев.

Показана принципиальная схема применения нейтронного излучения. Приведены сравнительные данные о разных видах нейтронных излучений. Разрешающая способность нейтронного излучения – 50...60 мкм, синхротронного – 1 мкм. В качестве примеров рассмотрено использование нейтронного излучения для исследования динамики абсорбции воды древесиной бука и каштана; синхротронного излучения – изменения строения древесины при сжатии, проникновении связующего, проводящей ткани древесины бука, клеевых прослоек. Среди других неразрушающих методов показаны возможности использования термографии при определении расслоений, сучков и других пороков древесины, теплоизоляционной способности стен из различных древесных материалов.

*Третья лекция* была посвящена перспективному материалу из древесины – перекрестно-слоистым древесным плитам КЛТ (Cross Laminated Timber). Этот вид древесных материалов называют «инженерной древесиной» в связи с тем, что она имеет повышенную добавленную стоимость. Плиты КЛТ, как и фанера, состоят из нечетного (3–11) количества взаимно перпендикулярных слоев массивной древесины. Доски (ламели) соединяют с помощью клея, гвоздей, нагелей, крепов или шипов. Плиты КЛТ используют для изготовления сейсмоустойчивых деревянных конструкций, автодорожных мостов с максимальной нагрузкой до 40 т, кровельных конструкций, домов заводского изготовления, односемейных коттеджей, школьных зданий, многоэтажных домов, уникальных сооружений (например опор для ветряных двигателей вы-

сотой до 160 м). Доступность современного научного оборудования для отдела физики древесины позволила провести достаточно широкий набор испытаний свойств плит КЛТ. Было исследовано влияние масштабного фактора на показатели механических свойств и разработаны методы их расчета, показана зависимость прочности при изгибе от направления волокон, степень уменьшения прочности из-за прорезей, получены изотермы сорбции. Предел гигроскопичности у КЛТ оказался равен 24 % (вместо 32 % у ели). Установлены значения усушки и разбухания. С помощью нейтронного излучения определены профили распределения влажности по толщине плиты. Были проведены исследования влияния различных факторов на теплопроводность плит. Например, было показано, что способ соединения ламелей, вызывающий уменьшение плотности плиты, существенно снижает ее теплопроводность.

Исследованы напряжения, возникающие в наружных слоях при снижении влажности во время производства и эксплуатации, способы уменьшения сушильных напряжений. Проведено моделирование развития напряжений с учетом так называемого механо-сорбционного течения. Этот вид деформационных превращений правильней следует называть замороженной усушкой. Выполнены расчеты процессов диффузии. Методом конечных элементов рассчитаны коробление и ее изменение в процессе высыхания плиты. Проведены термографические исследования стен из плит КЛТ.

Проф. П. Нимц и ведущие сотрудники кафедры древесиноведения МГУЛ посетили Институт физики твердого тела РАН, где зав. лабораторией Н.В. Классен познакомил с работами института в области биоморфных нанокompозитов.

Лекции и беседы проф. П. Нимца показали широкие возможности современной науки и заинтересованность ученых в раскрытии тайн древесины – удивительного дара живой природы.

**Fundamental and Applied Research on Wood in Swiss Federal  
Institute of Technology Zurich (ETHZ)**

*B.N. Ugolev<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Professor*

*G.A. Gorbacheva<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Associate Professor*

*P. Nimts<sup>2</sup>, Professor, Board Member IAWS*

<sup>1</sup>Moscow State Forest University, 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi-5, 141005,  
Moscow Region, Russia

E-mail: ugolev@mgul.ac.ru

<sup>2</sup>Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Hauptgebäude Rämistrasse 101,  
Zürich, 8092, Switzerland