

DOI: 10.12737/8451

УДК 53.082.63

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПО ОТКЛИКУ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕОДНОРОДНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

доктор физико-математических наук, профессор **Н. Н. Матвеев**<sup>1</sup>

кандидат физико-математических наук **Н. Ю. Евсикова**<sup>1</sup>

кандидат физико-математических наук **Н. С. Камалова**<sup>1</sup>

кандидат физико-математических наук, доцент **В. В. Саушкин**<sup>1</sup>

1 – ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия»,  
Воронеж, Российская Федерация

Механические характеристики древесных материалов во многом определяются надмолекулярной структурой волокнообразующей компоненты древесины – целлюлозы. Исследование микроструктуры древесины сопряжено с рядом трудностей, обусловленных тем, что древесина – это сложный пористый композит с взаимовлияющими друг на друга составляющими, что делает надмолекулярное строение этого материала довольно чувствительным к изменениям окружающей среды. Поэтому актуальной является задача разработки методов неразрушающего контроля изменений надмолекулярной структуры целлюлозы непосредственно в образцах древесины. С этой целью рассматривается отклик древесины на воздействие неоднородного температурного поля. В работе показано, что кристаллиты целлюлозы являются центрами поляризации в волокнообразующей части биокompозита – древесины, помещенной в неоднородное температурное поле. Получено выражение, описывающее зависимость логарифма вероятности поляризации целлюлозы от степени ее кристалличности для различных соотношений кристаллической и аморфной частей целлюлозы. В результате анализа построенных на основе полученного выражения графических зависимостей обнаружено, что точка излома оценочных кривых практически совпадает с известной средней степенью кристалличности древесной целлюлозы. Это позволяет предположить, что если степень кристалличности целлюлозы в древесине превысит это барьерное значение, то вероятность поляризации боковых групп макромолекул начнет резко возрастать с ростом относительной неоднородности температуры. Эксперимент подтверждает, что неоднородное температурное поле приводит к возникновению электрического поля в образцах древесины, природой которого служат термополяризационные явления в кристаллитах целлюлозы. Поэтому измеряя разность потенциалов возникающего поля, можно исследовать особенности надмолекулярной структуры целлюлозы. Появляется возможность разработки электроизмерительных способов контроля изменений надмолекулярной структуры целлюлозы.

**Ключевые слова:** надмолекулярная структура целлюлозы, поляризованность, неоднородное температурное поле.

**STUDY OF THE SUPRAMOLECULAR STRUCTURE OF CELLULOSE BY THE RESPONSE TO THE IMPACT OF INHOMOGENEOUS TEMPERATURE FIELD**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor **N. N. Matveev**<sup>1</sup>

PhD in Physics and Mathematical Sciences **N. Y. Evsikova**<sup>1</sup>

PhD in Physics and Mathematical Sciences **N. S. Kamalova**<sup>1</sup>

PhD in Physics and Mathematical Sciences, Associate Professor **V. V. Saushkin**<sup>1</sup>

1 – FSBEI HPE «Voronezh State Academy of Forestry and Technologies»,  
Voronezh, Russian Federation

**Abstract**

Mechanical characteristics of wood materials are largely determined by the supramolecular structure of fiber-forming components of wood – cellulose. Investigation of the microstructure of wood is associated with a number of difficulties due to the fact that the timber – a complex porous composite with interdependent on each other components which makes supramolecular structure of this material quite sensitive to changes in the environment. Therefore, the actual problem is the development of methods of nondestructive testing of changes of the supramolecular structure of cellulose directly into the samples of timber. To this end, the response of wood on the impact of an inhomogeneous temperature field is considered. It is shown that the cellulose crystallites are centers of polarization in the fiber-forming part of biocomposite - wood, placed in the non-uniform temperature field. An expression describing the dependence of the logarithm of polarization probability of cellulose on the degree of its crystallinity for various ratios of crystalline and amorphous parts of the cellulose is got. As a result of analysis based on the constructed expression of plots it was revealed that the break point of evaluation curves practically coincides with the known average crystallinity of woodpulp. This suggests that if the degree of crystallinity of the cellulose in wood exceeds this barrier value, the probability of polarization of side groups of the macromolecules begins to increase sharply with increasing temperature relative inhomogeneity. The experiment confirms that non-uniform temperature field leads to appearance of electric field in the sample timber, the nature of which is the thermal polarization phenomena in cellulose crystallites. Therefore, measuring the potential difference of occurring field, you can explore the features of the supramolecular structure of cellulose. There is an opportunity to develop electrical and measuring ways to control changes of the supramolecular structure of cellulose.

**Keywords:** supramolecular structure of cellulose, polarization, inhomogeneous temperature field.

В настоящее время ведутся многочисленные исследования способов модификации древесины с целью получения новых конструкционных и защитных материалов с наилучшими эксплуатационными характеристиками, а также разрабатываются технологии производства таких материалов с

оптимальными технико-экономическими показателями [1, 2, 3, 4]. Область использования материалов, созданных на основе древесины, значительно расширилась. Композиты из древесины и пластика (например, биопластик и арбоформ) находят применение в упаковочной и автомобиль-

ной отраслях, при производстве потребительских товаров и в строительстве [5]. Модифицирование древесины мягких лиственных пород уплотнением, пропиткой или уплотнением с последующей пропиткой производится с целью расширения объемов переработки малоиспользуемой древесины. Так, изделия из уплотненной древесины мягких лиственных пород заменяют аналогичные изделия из остро дефицитной древесины твердых лиственных пород. Детали, изготовленные из прессованной древесины, применяются в машиностроении, поскольку прессованная древесина по прочностным характеристикам приближается к стали. При этом механические характеристики древесных материалов во многом определяются надмолекулярной структурой волокнообразующей компоненты древесины – целлюлозы. Однако исследование микроструктуры последней сопряжено с рядом трудностей:

1) выделенная из древесных образцов целлюлоза меняет свою надмолекулярную структуру в процессе выделения, т.к. при этом молекулярные кристаллиты разрушаются или существенно перестраиваются;

2) древесина – это сложный пористый композит с взаимовлияющими друг на друга составляющими, что делает надмолекулярное строение этого материала довольно чувствительным к изменениям окружающей среды;

3) наполнитель клеточной стенки – лигнин является нерегулярной средой со свойствами, исследуемыми методами моделирования.

Поэтому актуальной становится задача разработки методов неразрушающего кон-

троля древесины, которые позволят наблюдать за динамикой микроструктуры древесной целлюлозы. Фактически в таких методах анализируется отклик древесины на физическое воздействие. В качестве внешнего физического воздействия можно использовать электромагнитное излучение сверхвысоких частот, импульсное магнитное поле или неоднородное температурное поле.

Для анализа воздействия неоднородного температурного поля на древесину в работах [6, 7, 8, 9, 10, 11] этот сложный материал предложено моделировать полимерным композитом, основными компонентами которого являются частично кристаллическая волокнообразующая целлюлоза и аморфный лигнин, представляющий собой эластичный связующий наполнитель. Для оценки отклика подобного композита на воздействие неоднородного температурного поля необходимо учесть пирозлектрический эффект в кристаллитах целлюлозы, пьезоэлектрический эффект, обусловленный деформацией кристаллитов целлюлозы в силу теплового расширения вязкого полимерного наполнителя – лигнина, и ориентационную поляризованность  $dP_{in}$  в боковых полярных группах макромолекул целлюлозы в электрическом поле, возникающем в аморфной части древесины вследствие пирозлектрического и пьезоэлектрического эффектов в кристаллитах целлюлозы [7]. Таким образом, суммарную поляризованность целлюлозы в неоднородном температурном поле можно оценить как

$$dP_i = -d_{ijk}c_{kjml}\mu_{ml}adT + \gamma_i dT + dP_{in}, \quad (1)$$

где  $d_{ijk}$  – тензор пьезоэлектрических модулей,

$c_{jkml}$  – константы упругой жесткости,

$\mu_{ml}$  – отношение модуля Юнга лигнина к модулю Юнга целлюлозы,

$\alpha$  – коэффициент теплового расширения лигнина,

$\gamma_i$  – пирозлектрический коэффициент целлюлозы.

Исходя из возможных механизмов поляризации, ориентационная поляризованность  $P_{in}$  боковых групп макромолекул целлюлозы будет определяться суммой деформационной поляризованности  $P_{деф}$ , обусловленной электронной поляризацией, и ориентационной поляризованности  $P_{оп}$ , связанной с поворотом боковых полярных групп полимера:

$$P_{in} = P_{деф} + P_{оп}. \quad (2)$$

Первое слагаемое в (2) связано с возникновением диполей, индуцированных внешним полем. Величина второго слагаемого может быть результатом наложения двух процессов: дипольно-сегментальной и дипольно-групповой ориентаций. Первый из этих релаксационных процессов связан с подвижностью звеньев макромолекулы в электрическом поле, а второй обусловлен, в основном, подвижностью боковых полярных групп, способных ориентироваться в электрическом поле независимо друг от друга и имеющих разные времена релаксации:

$$P_{оп} = P_{дс} + P_{дг}. \quad (3)$$

Здесь  $P_{дс}$  – поляризованность, вызванная дипольно-сегментальным процессом, а  $P_{дг}$  – поляризованность, вызванная дипольно-групповым процессом. В сложных полимерных композитах, содержащих волокнообразующую составляющую, вклад первого слагаемого значительно меньше, поскольку ориентации звеньев сильно ме-

шает фибриллярная структура волокна, поэтому ориентационная поляризованность будет определяться, в основном, дипольно-групповым механизмом. В рамках такого подхода, ориентационную поляризованность целлюлозы во внешнем электрическом поле с напряженностью  $E$  можно представить в виде:

$$P_{in} = (Nk_{деф} + N_2 k_{оп})E, \quad (4)$$

где  $N$  – общее количество боковых полярных групп макромолекулы,

$k_{деф}$  – деформационная восприимчивость электронных оболочек атомов в молекуле,

$N_2$  – число относительно свободных боковых полярных групп макромолекулы,

$k_{оп}$  – ориентационная восприимчивость боковой группы.

Как показывает расчет, относительное изменение ориентационной поляризованности подобного полимера будет прямо пропорционально относительному изменению числа частично свободных боковых групп:

$$\varepsilon_{in} = \frac{dP_{in}}{P_{in}} = \frac{dN/N}{1 + (N_2/N)(k_{оп}/k_{деф})} \cdot \frac{k_{оп}}{k_{деф}}. \quad (5)$$

Заметим, что  $(N_2/N) \cdot (k_{оп}/k_{деф}) \rightarrow 0$ , поскольку релаксационные процессы замедленны и свободные боковые группы имеются не у каждой молекулы. Это позволяет получить из (5) оценочное выражение для относительного изменения ориентационной поляризованности волокнообразующих полимеров:

$$\frac{dP_{in}}{P_{in}} = \frac{dN}{N} \frac{k_{оп}}{k_{деф}}. \quad (6)$$

Тогда величина ориентационной поляризованности  $P_{in}$  боковых групп макро-

молекул целлюлозы, как отклика микро-структуры целлюлозы на наличие неоднородности температуры в полимерном композите – древесине, будет определяться выражением:

$$P_{in} = P_0 \exp(dN/N) \approx P_0(1 + dN/N), \quad (7)$$

где  $P_0$  – спонтанная поляризованность, присущая композиту в отсутствие неоднородности температуры.

Выражение (7) учитывает, что  $dN/N \ll 1$ . В таком приближении получается, что изменение ориентационной поляризованности при наличии неоднородности температуры прямо пропорционально относительному изменению числа частично свободных боковых групп некристаллической части целлюлозы.

Оценить относительное число частично свободных боковых групп, ориентирующихся в электрическом поле с напряженностью  $E$ , можно, описывая данный процесс с точки зрения термодинамики:  $dN/N = \exp(-\Delta S/R)$ , где  $\Delta S$  – изменение конформационной энтропии целлюлозы в 1 моле вещества древесины. Выражение для  $\Delta S$  можно получить путем анализа изменения свободной энергии Гельмгольца  $\Psi$ .

Рассмотрим образец древесины толщиной  $l_0$ , объемом  $V$ , помещенный в неоднородное температурное поле с величиной неоднородности температуры  $\Delta T$ . Пусть температура по толщине образца (выделенное направление  $x$ ) изменяется по закону  $T = T_0(1 + kx)$ , где  $k = \Delta T/(l_0 T_0)$ ,  $T_0$  – начальная температура в слое. В таких условиях эластичный аморфный лигнин расширяется, сжимая целлюлозу с давлением  $p = -c_L \alpha \Delta T$  (здесь  $c_L$  и  $\alpha$  – модуль

Юнга и коэффициент теплового расширения лигнина, соответственно). Из-за относительной малости величины неоднородности температуры  $\Delta T/T_0$  можно предположить, что при взаимодействии целлюлозы с лигнином произведение флуктуации ее конформационной энтропии  $\Delta S$  на температуру будет значительно превышать изменение внутренней энергии  $\Delta U$  ( $\Delta U \ll T \Delta S$ ). Тогда для давления в целлюлозе справедлива оценка:

$$p = -(\partial \Psi / \partial V) = T(dS/dV). \quad (8)$$

С учетом закона изменения температуры вдоль выделенного направления  $x$  ( $0 < x < l_0$ ) из (8) можно получить выражение для изменения энтропии в направлении увеличения температуры:

$$\Delta S = -\alpha c_L s l_0 \ln(1 + x \Delta T / (l_0 T_0)), \quad (9)$$

где  $s$  – площадь слоя. Это позволяет записать выражение для натурального логарифма вероятности поляризации в виде [11]:

$$\ln W = \ln \Delta N / N = -\Delta S / R \approx (\alpha c_L s l_0 \Delta T^2 / RT_0^2) \cdot V / V_0. \quad (10)$$

Можно показать, что в случае, когда плотности аморфной  $\rho_a$  и кристаллической  $\rho_{кр}$  фаз целлюлозы не меняются при изменении степени ее кристалличности  $\eta$ , величина  $V/V_0 \approx (1 - \eta) \rho_a / (\rho_a - \eta \rho_{кр})$  [11]. Тогда натуральный логарифм вероятности поляризации будет связан со степенью кристалличности соотношением:

$$\ln W = (\alpha c_L s l_0 \Delta T^2 / RT_0^2) \cdot (1 - \eta) \rho_a / (\rho_a - \eta \rho_{кр}). \quad (11)$$

Введем в полученном соотношении следующие обозначения:  $\delta_T = \Delta T / T_0$  – относительная неоднородность температуры

в образце;  $\varepsilon = \alpha c_x s l_0 / R$  – величина, которую предлагается трактовать как долю энергии взаимодействия составляющих композита от тепловой для одного моля при неоднородности температуры в 1 К (именно этот параметр определяет влияние на армирующую составляющую физических свойств наполнителя);  $\chi = \rho_{кр} / \rho_a$  – отношение плотностей кристаллической и аморфной составляющих. Тогда оно переписывается в виде:

$$\ln W = \varepsilon \delta_T^2 \cdot (1 - \eta) / (1 - \eta \chi) \quad (12)$$

Используя соотношение (12), получаем ряд графических зависимостей логарифма вероятности поляризации целлюлозы от степени ее кристалличности для различных значений введенных выше параметров. Пример таких зависимостей приведен на рис. 1. Нанося на полученную графическую диаграмму экспериментальные данные, можно определять параметр  $\varepsilon$  для наполнителя композита. Интересным является тот факт, что точка излома оценочных кривых на рис. 1 практически совпадает с известной средней степенью кристалличности древесной целлюлозы. Поэтому можно предположить, что при превышении степени кристалличности целлюлозы в древесине этого барьерного значения вероятность поляризации боковых групп макромолекул начнет резко возрастать с ростом относительной неоднородности температуры.

Кроме того, соотношения (10) и (12) позволяют оценить относительное число свободных боковых групп  $\Delta N / N$ , с учетом которого получаем выражение для изменения суммарной поляризованности цел-

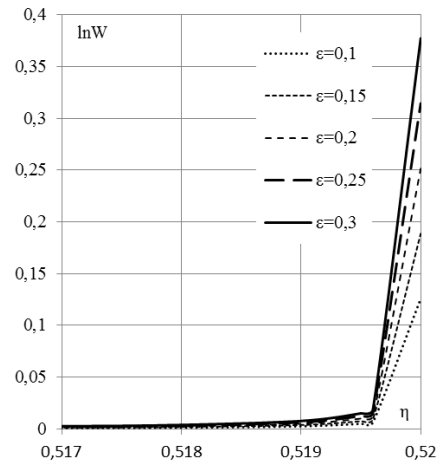


Рис. 1. Зависимость логарифма вероятности поляризации боковых ветвей макромолекулы целлюлозы в неоднородном температурном поле от степени кристалличности последней

люлозы в образце древесины толщиной  $l_0$  в неоднородном температурном поле с постоянным градиентом температуры  $\Delta T / l_0$  в выделенном направлении  $x$ :

$$dP_i = (\gamma_i - d_{ijk} c_{jklm} \mu_{ml} \alpha + P_0 \alpha c_x s \Delta T / RT_0 l_0) dT \quad (13)$$

Используя выражение (13), несложно получить оценку для величины разности потенциалов электрического поля, возникающего в полимерном композите – древесине, в результате отклика древесной целлюлозы на воздействие неоднородного температурного поля:

$$U = U_\gamma + \alpha \mu_T U_0 (1 - (U_{ml} / U_0) \mu_{ml} / \mu_T) \Delta T / l_0 \quad (14)$$

Здесь  $U_\gamma$  и  $U_{ml}$  показывают вклады в возникающую разность потенциалов пироэлектрического и пьезоэлектрического эффектов в кристаллитах целлюлозы соответственно,  $U_0$  описывает вклад ориентационной поляризации полярных боковых

групп аморфной части целлюлозы,  $\mu_T = c_s l_0 s / RT_0$  – ориентационная восприимчивость аморфной части целлюлозы.

Факт, что в неоднородном температурном поле за счет различий в тепловом расширении составляющих системы, пьезо- и пироэлектрических свойств целлюлозы и поляризации свободных боковых групп молекул последней возникает электрическое поле подтвержден экспериментально. Разность потенциалов в поперечном слое составляет 35-50 мВ при неоднородности температуры порядка 2 К на 100 мкм. Подобное явление в слоях древесины может лечь в основу разработки термоэлектрических преобразователей энергии [12].

Выражение (14) показывает, что отклик сложного биокompозита – древесины на воздействие неоднородного температурного поля напрямую определяется над-

молекулярной структурой целлюлозы, и его можно фиксировать с помощью электроизмерительных приборов. Это может служить научной основой для разработки неразрушающих электроизмерительных способов контроля изменений надмолекулярной структуры целлюлозы непосредственно в образцах древесины. Кроме того, измерения разности потенциалов для различных пород древесины возможно применять для сравнения их микроструктуры, а следовательно для объяснения различия их механических свойств. Необходимо заметить, что изучение термополяризационных явлений в древесине открывает перспективы для разработки способов исследования растворов солей в порах древесины, что может лечь в основу принципа работы датчиков по контролю влажности древесины во время сушки.

### Библиографический список

1. Ультразвуковая обработка древесины [Электронный ресурс] / А. Воякин // Лесная индустрия. – 2014. – № 11 (79). – Режим доступа: [http://www.lesindustry.ru/issues/li\\_n79/Ultrazvukovaya\\_obrabotka\\_drevesini\\_982/](http://www.lesindustry.ru/issues/li_n79/Ultrazvukovaya_obrabotka_drevesini_982/)
2. Пропитка лесоматериалов в пьезопериодическом поле [Текст] / О. Куницкая, С. Бурмистрова, Ю. Гончаров // ЛесПромИнформ. – 2014. – № 7 (105).
3. Анизотропия механических свойств модифицированного биокompозита, обработанного импульсным магнитным полем [Текст] / В. В. Постников, Н. С. Камалова // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2011. – № 9 (101). – С. 92-94.
4. Постников, В. В. Возможные механизмы поглощения ультразвука в древесине [Текст] / В. В. Постников, Н. С. Камалова // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 2 (6). – С. 32-36.
5. Механизм упрочнения модифицированного высокомолекулярного биокompозита после воздействия слабых импульсных магнитных полей. [Текст] / В. В. Постников, Н. С. Камалова // Материалы международной научно-технической конференции INTERMATIC – 2011, 14 – 17 ноября 2011 г. – Москва : МИРЭА, 2011. – Ч. 1. – С. 88-91.
6. Новый подход к определению степени кристалличности целлюлозы в древесине [Текст] / Н. Ю. Евсикова, Н. С. Камалова, Н. Н. Матвеев, В. В. Постников // Известия РАН. Серия физическая. – 2010. – Т. 74. – № 9. – С. 1373-1374.

7. Matveev, N. N. Thermal Polarization Effect in the Wood [Текст] / N. N. Matveev, N. S. Kamalova // 11 International Symposium on Ferroic Domains and Micro-to Nanoscopic Structures. 11 Russia / CIS / Baltic / Japan Symposium on Ferroelectricity : Abstract Book of the Joint International Symposium, Ekaterinburg, August 20-24, 2012 . – Екатеринбург, 2012. – С. 158.

8. Евсикова, Н. Ю. Флуктуации кристаллической структуры целлюлозы и контроль качества древесины [Текст] / Н. Ю. Евсикова // Лесотехнический журнал. – 2011. – № 3 (3). – С. 14-19.

9. Степень кристалличности целлюлозы и время релаксации сегментальной подвижности ее макромолекул в неоднородном температурном поле [Текст] / Н. Ю. Евсикова, Н. Н. Матвеев, Н. С. Камалова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 8. – С. 180-182.

10. Роль кристаллитов целлюлозы в поляризации биополимерного композита – древесины в неоднородном температурном поле [Текст] / Н. Н. Матвеев, Н. Ю. Евсикова, Н. С. Камалова, Н. И. Коротких // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2013. – Т. 77. – № 8. – С. 1185-1186.

11. Камалова, Н. С. Влияние надмолекулярной структуры целлюлозы на термодинамические свойства древесины [Текст] / Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова, Н. А. Саврасова // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2013. – Т. 15. – № 1. – С. 20-22.

12. Термоэлектрические преобразования энергии в порах древесины [Текст] / В. И. Лисицын, Н. С. Камалова, Н. А. Саврасова, И. П. Бирюкова, Б. М. Кумицкий, В. В. Саушкин // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 3 (7). – С. 12-14.

### References

1. Voyakin A. Ul'trazvukovaja obrabotka drevesiny [Ultrasonic treatment of timber]. *Lesnaja industrija – Forest Industry*, 2014, no. 11 (79). Available at: [http://www.lesindustry.ru/issues/li\\_n79/Ul'trazvukovaya\\_obrabotka\\_drevesini\\_982/](http://www.lesindustry.ru/issues/li_n79/Ul'trazvukovaya_obrabotka_drevesini_982/). (In Russian).

2. Kunitskaya A., Burmistrova S., Goncharov Y. Propitka lesomaterialov v p'ezoperiodicheskom pole [The impregnation of timber in piezoperiodic field]. *LesPromInform – LesPromInform*, 2014, no. 7 (105). (In Russian).

3. Postnikov V.V., Kamalova N.S. Anizotropija mehanicheskikh svojstv modificirovannogo biokompozita, obrabotannogo impul'snym magnitnym polem [The anisotropy of the mechanical properties of the modified biocomposite treated with pulsed magnetic field]. *Al'ternativnaja jenergetika i jekologija – "Alternative Energy and Ecology"*, 2011, no. 9 (101), pp. 92-94. (In Russian).

4. Postnikov V.V., Kamalova N.S. Vozmozhnye mehanizmy pogloshhenija ul'trazvuka v drevesine [Possible mechanisms of ultrasound absorption in the wood]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2012, no. 2 (6), pp. 32-36. (In Russian).

5. Postnikov V.V., Kamalova N.S. *Mehanizm uprochnenija modificirovannogo vysokomolekuljarnogo biokompozita posle vozdejstviya slabym impul'snym magnitnym polem* [The mechanism of hardening of the modified high molecularbiocomposite after exposure to weak pulsed magnetic fields] *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii INTERMATIC – 2011*, 14 – 17



*nojabrja 2011 g.* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference INTERMATIC - 2011, 14 - November 17, 2011]. Moscow, 2011, Part 1, pp.88-91. (In Russian).

6. Evsikova N.Y., Kamalova N.S., Matveev N.N., Postnikov V.V. Novyj podhod k opredele-niju stepeni kristallichnosti celljulozy v drevesine [A new approach to the determination of the degree of crystallinity of the cellulose in the wood]. *Izvestija RAN. Serija fizicheskaja – Proceedings of RAS. Physics series*, 2010, Vol. 74, no. 9, pp. 1373-1374. (In Russian).

7. Matveev N.N., Kamalova N.S. Thermal Polarization Effect in the Wood / 11 International Symposium on Ferroic Domains and Micro-to Nanoscopic Structures. 11 Russia / CIS / Baltic / Japan Symposium on Ferroelectricity : Abstract Book of the Joint International Symposium, Yekaterinburg, August 20–24, 2012, Yekaterinburg, 2012, pp. 158.

8. Evsikova N.Y. Fluktuacii kristallicheskoj struktury celljulozy i kontrol' kachestva drevesiny [Fluctuations of crystal structure of cellulose and wood quality control]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2011, no. 3 (3), pp. 14-19. (In Russian).

9. Evsikova N.Y., Matveev N.N., Kamalova N.S. Stepen' kristallichnosti celljulozy i vremja re-laksacii segmental'noj podvizhno-sti ee makromolekul v neodnorodnom temperaturnom pole [The degree of crystallinity of cellulose and the relaxation time of segmental mobility of its macromolecules in a nonuniform temperature field]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta – Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2011, Vol. 7, no. 8, pp. 180-182. (In Russian).

10. Matveev N.N., Evsikova N.Y., Kamalova N.S., Korotkikh N.I. Rol' kristallitov celljulozy v poljarizacii biopolimernogo kompozita – dreve-siny v neodnorodnom temperaturnom pole [The role of cellulose crystallites in the polarization of the biopolymer composite - wood in a nonuniform temperature field]. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija fizicheskaja – Proceedings of RAS. Physics series*, 2013, Vol. 77, no. 8, pp. 1185-1186. (In Russian).

11. Kamalova N.S., Evsikova N.Y., Savrasova N.A. Vlijanie nadmolekuljarnoj struktury celljulozy na termodinami-cheskie svojstva drevesiny [Influence of the supramolecular structure of cellulose on the thermodynamic properties of wood]. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granicy – Condensed Media and interphase boundaries*, 2013, Vol. 15, no. 1, pp. 20-22. (In Russian).

12. Lisitsyn V.I., Kamalova N.S., Savrasova N.A., Biryukova I.P., Kumitsky B.M., Saushkin V.V. Termojelektricheskie preobrazovaniya jenergii v porah drevesiny [Thermoelectric energy conversion in the pores of the wood]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2012, no. 3 (7), pp. 12-14. (In Russian).

### Сведения об авторах

*Матвеев Николай Николаевич* – первый проректор, профессор кафедры общей и прикладной физики ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», доктор физико-математических наук, профессор, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: [nc@icmail.ru](mailto:nc@icmail.ru).

*Евсикова Наталья Юрьевна* – преподаватель кафедры общей и прикладной физики ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», кандидат физико-математических наук, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: [nc@icmail.ru](mailto:nc@icmail.ru).

*Камалова Нина Сергеевна* – доцент кафедры общей и прикладной физики ФГБОУ ВПО

«Воронежская государственная лесотехническая академия», кандидат физико-математических наук, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: rc@icmail.ru.

*Саушкин Виктор Васильевич* – доцент кафедры общей и прикладной физики ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», кандидат физико-математических наук, доцент, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: rc@icmail.ru.

### Information about authors

*Matveev Nikolay Nikolaevich* – Vice-Rector, Professor of the Department General and Applied Physics of FSBEI HPE «Voronezh State Academy of Forestry and Technologies», Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: rc@icmail.ru.

*Evsikova Natalya Yuryevna* – Lecturer of the Department General and Applied Physics of FSBEI HPE «Voronezh State Academy of Forestry and Technologies», PhD in Physics and Mathematical Sciences, Voronezh, Russian Federation; e-mail: rc@icmail.ru.

*Kamalova Nina Sergeevna* – Associate Professor of department General and Applied Physics of FSBEI HPE «Voronezh State Academy of Forestry and Technologies», PhD in Physics and Mathematical Sciences, Voronezh, Russian Federation; e-mail: rc@icmail.ru.

*Saushkin Victor Vasilyevich* – Associate Professor of department General and Applied Physics of FSBEI HPE «Voronezh State Academy of Forestry and Technologies», PhD in Physics and Mathematical Sciences, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: rc@icmail.ru.

DOI: 10.12737/8454

УДК 674.093.26

### УСТАНОВЛЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СКЛЕИВАНИЯ ФАНЕРЫ НА ЕЕ ПРОЧНОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМОЛ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ФОРМАЛЬДЕГИДА

кандидат технических наук, профессор **В. С. Мурзин**<sup>1</sup>

кандидат технических наук, доцент **Л. В. Пономаренко**<sup>1</sup>

кандидат технических наук, доцент **Е. В. Кантиева**<sup>1</sup>

**А. А. Котенева**<sup>1</sup>

1 – ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия»,  
г. Воронеж, Российская Федерация

Фанера нашла широкое применение во всех отраслях народного хозяйства. Она имеет небольшой вес, легко комбинируется с другими материалами, проста в обработке, устойчива к перепадам температуры, имеет эстетичный внешний вид. Ее прочностные, теплопроводные и другие характеристики гораздо выше показателей прочих клееных материалов. Так же фанера, с ее относительным соотношением высоких эксплуатационных показателей и себестоимости производства гораздо выгоднее в сравнении с продукцией, изготовленной из пластика и металлов. С