

## ДЕФОРМАЦИИ И ПРОЧНОСТЬ LVL ПРИ СЖАТИИ В УСЛОВИЯХ ОТТАИВАНИЯ

### DEFORMATION AND COMPRESSIVE STRENGTH OF LVL UNDER COMPRESSION IN CONDITIONS OF DEFROSTING

Прочностные и деформативные свойства древесины и композиционных материалов на ее основе (таких как LVL) при заданной влажности обратно пропорциональны температуре. Это открывает широкие возможности для применения деревянных конструкций в условиях холодного климата, включая арктический. При этом действительный характер температурно-влажностных условий эксплуатации, как правило, не является стационарным. Выполнено экспериментальное определение прочности и деформаций LVL при сжатии вдоль и поперек волокон в трех ортогональных направлениях в условиях оттаивания с различными начальными температурами и скоростью нагружения. При снижении начальной температуры от 0 до  $-70$  °C полученные временные сопротивления материала оказываются выше до 35 %.

*Ключевые слова:* материалы на основе древесины, LVL, кинетическая концепция разрушения твердых тел, прочность, оттаивание, теплоперенос.

The strength and strain properties of wood and composite wood-based materials (such as LVL) at a given humidity are inversely proportional to temperature. This opens up great opportunities for the use of timber structures in cold climate conditions, including the Arctic climate. At the same time, the actual nature of temperature and humidity operating conditions is usually not stationary. There was carried out an experimental determination of LVL strength and deformations under compression along and across the fibers in three orthogonal directions under defrosting conditions with different initial temperatures and loading rates. When the initial temperature is reduced from 0 to  $-70$  °C, the obtained temporary resistances of the material are higher by up to 35 %.

*Keywords:* wood-based materials, LVL, kinetic approach to the fracture of solids, strength, defrosting, heat transfer.

#### Введение

Прочностные и деформативные свойства древесины и композиционных материалов на ее основе (таких как LVL) при заданной влажности обратно пропорциональны температуре. Это предоставляет широкие возможности для применения деревянных конструкций в условиях холодного климата, включая арктический. Действительный характер температурно-влажностных условий эксплуатации не является стационарным. Следовательно, интенсивность влияния условий среды эксплуатации объекта на его сопротивление

воздействиям не постоянна, во многом имеет случайный характер и в целом трудно предсказуема. Тем не менее, с целью повышения механической безопасности объектов деревянного строительства необходимо разрабатывать методы учета нестационарных средовых воздействий на несущую способность конструкций. Особенно важным это представляется в экстремальных климатических условиях, характерных, например, для северных регионов.

Исследованием прочности древесины и материалов на ее основе при низких от-

рицательных температурах занимались М. Д. Бойко, А. Н. Елхин, А. И. Фоломин, В. С. Панфилов, F. Kollmann, В. Thunell, L. Vorreiter и др. [1–9]. При рассмотрении разных пород древесины, напряженно-деформированного состояния и диапазонов температур авторами отмечались изменения прочностных и упругих характеристик материала, несущей способности конструкций (балок) [10–13]. Прочность синтетических клеев, используемых при производстве клееной древесины, также повышается со снижением температуры эксплуатации. Отмечается снижение прочности на сдвиг клеевых соединений и влияние на нее продолжительности пребывания образцов при одной температуре [14, 15], изменение прочности клеевых соединений при температурах от 0 до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  при стационарных температурно-влажностных состояниях, повышение вязкости [16–18] и долговечности некоторых смол, в том числе фенолформальдегидных [19], применяемых в изготовлении LVL.

Прочность большинства строительных материалов определяется термофлуктуационным механизмом разрушения твердых тел. Разработкой и развитием этой теории (так называемой кинетической концепции прочности) занимались С. Н. Журков, В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский [20, 21], Г. М. Бартенев [22, 23], С. Б. Ратнер, В. П. Ярцев, Л. Б. Потапова, О. А. Киселева и др. [24–26]. Согласно кинетической концепции снижение температуры увеличивает время до разрушения элемента конструкции или образца при испытаниях. Увеличение прочности, а соответственно, и времени до разрушения при линейно возрастающей нагрузке было подтверждено экспериментально [1–8]. На основании кинетической концепции прочности возможно прогнозирование долговечности и обоснование продления сроков эксплуатации с использованием прямого или ускоренного методов испытаний [27, 28].

Стандартные испытания, как правило, предполагают постоянную температуру и влажность. Однако в реальных нестационарных условиях работы из-за климатических изменений в конструкции могут возникать колебания данных факторов. LVL также чувствителен к этим изменениям, причем в зависимости от направления волокон — по-разному [29–35]. При испытаниях в климатической камере с постоянной температурой материал имеет более высокие прочностные характеристики [36], чем материал, подвергаемый одновременному действию механического и термодеструкции [37–39].

Причиной теплопереноса в конструкции является разница температур, возникающая между атмосферной и установившейся в элементе. В процессе установления равновесной температуры возникает градиент во всем объеме образца. В зависимости от материала и величины температурного градиента скорость теплопередачи можно выразить как отношение количества теплоты, проходящей через заданную поверхность, к единице времени, или

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda dA \text{grad} T, \quad (1)$$

где  $Q$  — количество теплоты, Дж;  $t$  — время, с;  $T$  — температура, К;  $A$  — площадь поверхности,  $\text{m}^2$ ;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Дж/(с · м · К).

Изменение температуры во времени в любой точке среды описывается дифференциальным уравнением Фурье [40–42]:

$$\frac{d''}{dt} = a \nabla^2 t, \quad (2)$$

где  $\nabla^2$  — оператор Лапласа;  $a$  — коэффициент температуропроводности материала.

Граничными условиями для данной задачи распределения тепла как функции времени можно считать условие Неймана — условие второго рода. Решение уравнений (1) и (2) возможно при наличии значений констант, входящих в них. Для LVL они не известны, поэтому определение температурно-временной зависимости с целью ее учета при меха-

ническом разрушении требуется выполнять экспериментально.

Целью исследования является установление зависимостей прочности и деформаций LVL при сжатии вдоль и поперек волокон при различных начальной температуре оттаивания и скорости испытания.

### Методы

Призматические образцы однонаправленного клееного шпона (LVL типа I) размерами 65×65×65 мм были заморожены в камере «Тепло–холод–влага» серии КТХВ-3600 до следующих температур (по 5 шт.): –70 °С, –35 °С, 0 °С (203, 238 и 273 К соответственно). Указанные температуры приняты начальными для оттаивания в нормальных лабораторных условиях (температура воздуха  $20 \pm 2$  °С, относительная влажность воздуха  $60 \pm 5$  %). При помощи электронного секундомера и пирометра Optris MS установлена зависимость температуры образца от времени размораживания LVL с разными начальными температурами  $T_0$ . В результате испытания получена термограмма (рис. 1).

Анализ зависимости температуры образца от продолжительности и начальной температуры оттаивания показывает, что размораживание представляет собой единый

нелинейный во времени процесс. Таким образом, фактически оценить влияние начальной температуры оттаивания на механические характеристики материала представляется возможным только с одновременным учетом скорости нагружения, т. е. времени испытания и конечной температуры в эксперименте. Представленную на термограмме зависимость можно выразить функцией в виде полинома третьей степени:

$$T(t) = at^3 - bt^2 + ct + d, \quad (3)$$

где  $a = 0,0014$ ,  $b = 0,1486$ ,  $c = 5,636$  — коэффициенты уравнения аппроксимации;  $d = 203$  К — наименьшая начальная температура оттаивания  $T_0$ .

Уравнение (3) и термограмма на рис. 1 предлагаются в качестве модели оттаивания LVL в процессе механических испытаний при следующих необходимых допущениях:

- температурным влиянием испытательной установки можно пренебречь;
- диссипация механической энергии отсутствует;
- изменение упругих свойств материала при оттаивании не влияет на общий характер зависимости напряжений от деформаций;
- линейные размеры и объем образцов изменяются несущественно;

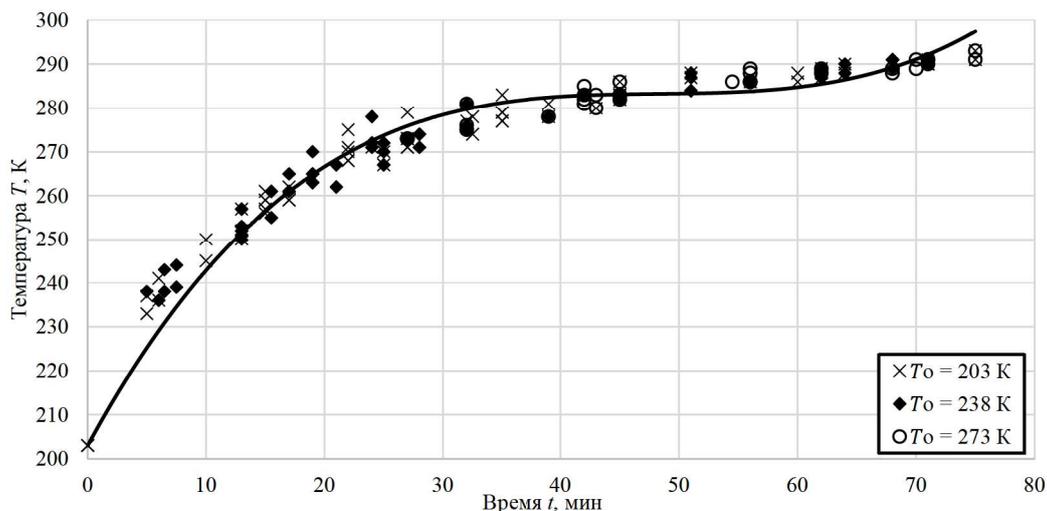


Рис. 1. Зависимость температуры образца от времени и начальной температуры  $T_0$

- анизотропией теплопроводности можно пренебречь в силу малого объема образца;

- влиянием клеевых прослоек на теплопроводность материала можно пренебречь;

- материал принимается сплошным квазигомогенным.

На основе принятой модели оттаивания LVL с указанными допущениями значения температуры, измеренные пирометром на поверхности образца, считались осредненными по всем точкам его объема. Область определения предложенной модели по выражению (3) — временной интервал от 0 до 75 мин и температурный интервал от 203 до 293 К.

С целью установления зависимостей прочности и деформаций LVL при сжатии вдоль и поперек волокон в плоскости и из плоскости слоев шпона (продольное, тангенциальное и радиальное направления соответственно) в условиях оттаивания от начальной температуры и скорости нагружения проведен следующий эксперимент: призматические образцы LVL типа I размерами 65×65×65 мм испытывались на сжатие в трех ортогональных направлениях до разрушения на универсальной испытательной машине POWERTEST U-600. Нагрузка прикладывалась непрерывно с линейным ростом перемещения нагружающего устройства, т. е. по «жесткому» режиму испытания [9, 28]. Скорость роста деформаций определяет время до разрушения, прочность,

конечную температуру разрушения. В связи с этим испытания проводились для трех различных скоростей перемещения штока машины  $w$ : 0,2 мм/мин, 2 мм/мин (стандартное значение), 20 мм/мин. Образцы предварительно замораживались в камере КТХВ-3600 до температур 203, 238 и 273 К. Таким образом, скорость нагружения  $w$  и начальная температура испытания  $T_0$  являются переменными факторами эксперимента и составляют девять парных комбинаций (табл. 1).

Количество испытанных образцов составило для каждой из них:

- в продольном направлении — 10 шт.;
- в тангенциальном направлении — 10 шт.;
- в радиальном направлении — 8 шт.

Определение механических характеристик замороженных образцов LVL с нестационарной теплопередачей выполнялось в нормальных лабораторных условиях ( $T = +20$  °С,  $W = 60$  %). Таким образом, в ходе эксперимента наблюдалось повышение температуры испытываемых образцов, т. е. их оттаивание. Температура воздуха в помещении и поверхности каждого образца в процессе и после нагружения фиксировалась пирометром Opttris MS. Влажность образцов определялась электрическим влагомером Testo 606 (табл. 2).

Средняя влажность образцов составила  $8 \pm 2$  %, т. е. соответствовала стандартной для LVL по ГОСТ 33124–2021.

Таблица 1

**Комбинации скорости нагружения  $w$  и начальной температуры  $T_0$  испытаний**

|              |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $w$ , мм/мин | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 2   | 2   | 2   | 20  | 20  | 20  |
| $T$ , К      | 203 | 238 | 273 | 203 | 238 | 273 | 203 | 238 | 273 |

Таблица 2

**Результаты измерения влажности  $W$**

| Кол-во измерений, шт. образцов | Среднее значение влажности $W_{cp}$ , % | Среднее квадратическое отклонение $s$ , % | Средняя ошибка среднего арифметического $s_x$ , % | Коэффициент вариации $v$ , % | Показатель точности среднего значения $\xi$ , % |
|--------------------------------|---|---|---|------------------------------|---|
| 252                            | 8,1                                     | 1,10                                      | 0,3695  | 13,58                        | 8,42  |

### Результаты

Зависимости нагрузок для LVL при соответствующих деформациях сжатия в продольном, тангенциальном и радиальном направлениях в условиях оттаивания от начальной температуры и скорости нагруже-

ния, полученные в результате механических испытаний, представлены на рис. 2. Графики для различных комбинаций переменных факторов обозначены разными цветами и типами линий, при этом в маркировке обозначены без скобок — начальная тем-

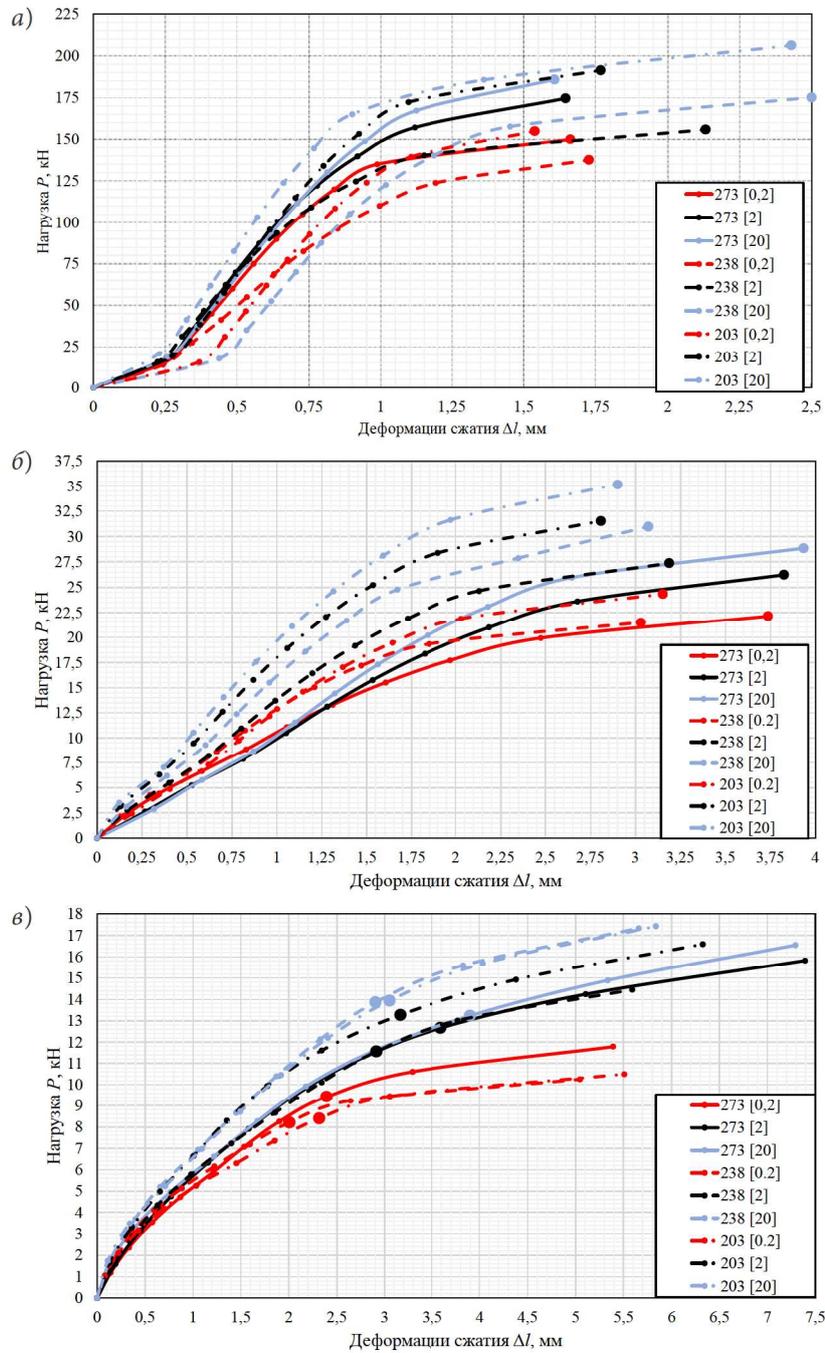


Рис. 2. Зависимости «деформация–нагрузка» при сжатии: а — вдоль волокон; б — в тангенциальном направлении; в — в радиальном направлении

пература (К), в квадратных скобках — скорость нагружения (мм/мин).

Крупными точками на графиках отмечена разрушающая нагрузка и соответствующее ей перемещение подвижного захвата испытательной машины. Можно отметить, что диаграммы деформирования, полученные для сжатия в продольном и тангенциальном направлениях, имеют общий вид, но отличаются друг от друга в количественном выражении. В то же время характер разрушения LVL при сжатии в радиальном направлении существенно отличается: наблюдаются большие пластические деформации, а явное разрушение отсутствует [28]. В этом случае по

аналогии с древесиной определялся условный предел прочности [34].

Обработанные экспериментальные данные по определению прочности и деформаций LVL при сжатии в трех ортогональных направлениях с различными начальными температурами и скоростями испытания в условиях оттаивания представлены в табл. 3. На рис. 3 приведен характерный вид разрушения образцов на примере испытаний со скоростью нагружения 20 мм/мин и начальной температурой оттаивания 203 К. Необходимо отметить, что в результате проведенного исследования не выявлено заметного влияния скорости нагружения и начальной температуры испытания на характер

Таблица 3

Результаты статистической обработки испытаний на сжатие

| № п/п | Направление сжатия | Начальная температура $T_0$ , К | Скорость испытания $v$ , мм/мин | Среднее значение прочности $R^{RP}$ , МПа | Коэффициент вариации $v$ | Доверительный интервал, МПа | Деформации $\Delta l$ , мм |
|-------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1     | Продольное         | 203                             | 0,2                             | 36,205                                    | 9,596                    | 2,153                       | 1,432                      |
| 2     |                    | 203                             | 2                               | 45,629                                    | 3,977                    | 1,125                       | 1,767                      |
| 3     |                    | 203                             | 20                              | 49,037                                    | 5,762                    | 1,751                       | 2,430                      |
| 4     |                    | 238                             | 0,2                             | 33,562                                    | 14,432                   | 1,001                       | 1,547                      |
| 5     |                    | 238                             | 2                               | 36,315                                    | 9,599                    | 2,161                       | 2,132                      |
| 6     |                    | 238                             | 20                              | 41,179                                    | 8,748                    | 2,232                       | 2,590                      |
| 7     |                    | 273                             | 0,2                             | 35,515                                    | 9,749                    | 2,146                       | 1,363                      |
| 8     |                    | 273                             | 2                               | 41,383                                    | 5,048                    | 1,295                       | 1,645                      |
| 9     |                    | 273                             | 20                              | 44,000                                    | 7,794                    | 2,125                       | 1,607                      |
| 1     | Тангенциальное     | 203                             | 0,2                             | 5,545                                     | 7,256                    | 0,249                       | 3,197                      |
| 2     |                    | 203                             | 2                               | 7,356                                     | 10,091                   | 0,460                       | 2,808                      |
| 3     |                    | 203                             | 20                              | 8,180                                     | 7,455                    | 0,378                       | 2,901                      |
| 4     |                    | 238                             | 0,2                             | 4,916                                     | 10,406                   | 0,317                       | 3,011                      |
| 5     |                    | 238                             | 2                               | 6,326                                     | 10,628                   | 0,417                       | 3,187                      |
| 6     |                    | 238                             | 20                              | 7,170                                     | 9,117                    | 0,405                       | 3,071                      |
| 7     |                    | 273                             | 0,2                             | 5,120                                     | 8,748                    | 0,289                       | 3,747                      |
| 8     |                    | 273                             | 2                               | 6,061                                     | 14,157                   | 0,532                       | 3,826                      |
| 9     |                    | 273                             | 20                              | 6,655                                     | 14,385                   | 0,593                       | 3,934                      |
| 1     | Радиальное         | 203                             | 0,2                             | 2,009                                     | 7,075                    | 0,105                       | 2,367                      |
| 2     |                    | 203                             | 2                               | 2,650                                     | 7,599                    | 0,149                       | 2,037                      |
| 3     |                    | 203                             | 20                              | 2,924                                     | 7,067                    | 0,153                       | 2,450                      |
| 4     |                    | 238                             | 0,2                             | 1,822                                     | 12,918                   | 0,163                       | 1,884                      |
| 5     |                    | 238                             | 2                               | 2,626                                     | 11,700                   | 0,227                       | 2,848                      |
| 6     |                    | 238                             | 20                              | 3,014                                     | 8,909                    | 0,199                       | 2,653                      |
| 7     |                    | 273                             | 0,2                             | 2,161                                     | 11,406                   | 0,183                       | 2,142                      |
| 8     |                    | 273                             | 2                               | 2,262                                     | 14,521                   | 0,337                       | 2,075                      |
| 9     |                    | 273                             | 20                              | 2,661                                     | 12,028                   | 0,237                       | 2,449                      |

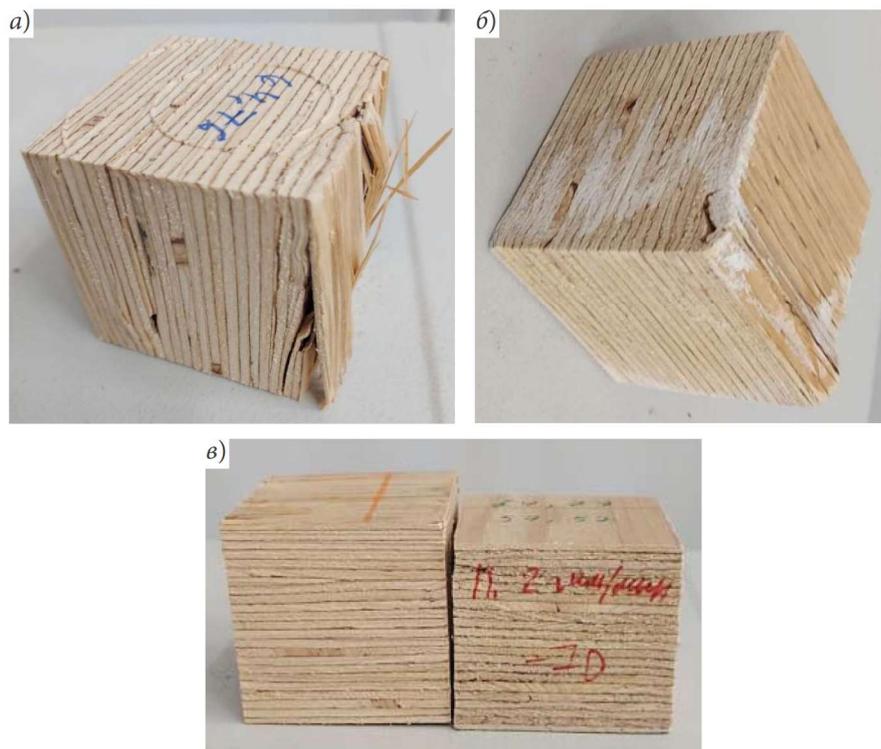


Рис. 3. Образцы LVL после испытания (характерный вид разрушения при сжатии):  
 а — в продольном направлении; б — в тангенциальном направлении;  
 в — в радиальном направлении (образец справа)

разрушения LVL в пределах от 0,2 до 20 мм/мин и от 203 до 273 К.

При сжатии LVL вдоль волокон и в тангенциальном направлении наблюдается смятие на торцах и расслоение в радиальном направлении. Отдельные слои шпона теряют устойчивость. Обнаруживаются трещины, локализованные в пределах одного или нескольких слоев (см. рис. 3, а, б). При сжатии в радиальном направлении происходит существенное уплотнение материала, т. е. значительные упругопластические деформации. После снятия нагрузки наблюдаются остаточные деформации сжатия, заметные невооруженным взглядом. Для сравнения на рис. 3, в приведены испытанный (справа) и не испытанный (слева) образцы. Существенного растрескивания LVL при сжатии в радиальном направлении для деформаций в пределах испытания (до 7,5 мм) не установлено.

### Обсуждение

Экспериментальные данные, полученные в результате проведенного исследования LVL типа I по определению прочности и деформаций при сжатии в трех ортогональных направлениях в условиях оттаивания, подтверждают совместное влияние температуры и скорости нагружения на сопротивление материала. Кратковременная прочность при сжатии в продольном, тангенциальном и радиальном направлениях с понижением в минус начальной температуры и времени оттаивания образцов повышалась. Полученные зависимости могут быть описаны выражением

$$R_c^{BP} = k_1 T_0^2 + k_2 (\lg w)^2 + k_3 T_0 \lg w + k_4 T_0 + k_5 \lg w + k_6, \quad (4)$$

где  $R_c^{BP}$  — кратковременная прочность при сжатии (в данных условиях), МПа;  $T_0$  — начальная температура оттаивания, К;  $\lg w$  —

логарифм скорости нагружения, взятой в мм/мин;  $k_1-k_6$  — коэффициенты уравнения аппроксимации (табл. 4).

Графически зависимость (4) прочности LVL от скорости и начальной температуры испытания для различных направлений сжатия в условиях оттаивания представляется поверхностями второго порядка (рис. 4).

Поверхность, представленная на рис. 4, а, — седловидная, функция  $R_c^{ap}[T_0; \lg w]$

прочности LVL при сжатии вдоль волокон в условиях оттаивания с начальной температурой  $T_0 = -35\text{ }^\circ\text{C}$ , вопреки ожиданиям, обладает минимумом при всех скоростях испытания. Поверхности на рис. 4, б, в — регулярные выпуклые, таким образом, функции прочности LVL при сжатии в тангенциальном и радиальном направлениях в условиях оттаивания имеют один минимум и один максимум при всех скоростях и начальных температурах испытания.

Таблица 4

**Значения коэффициентов уравнения аппроксимации кратковременной прочности LVL при сжатии**

| Направление сжатия | $k_1$ | $k_2$  | $k_3$  | $k_4$  | $k_5$  | $k_6$   |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Продольное         | 0,004 | -1,193 | -0,031 | -1,949 | 13,648 | 269,889 |
| Тангенциальное     | 0,000 | -0,117 | -0,007 | -0,020 | 2,422  | 11,271  |
| Радиальное         | 0,000 | -0,181 | 0,003  | -0,010 | 0,28   | 4,687   |

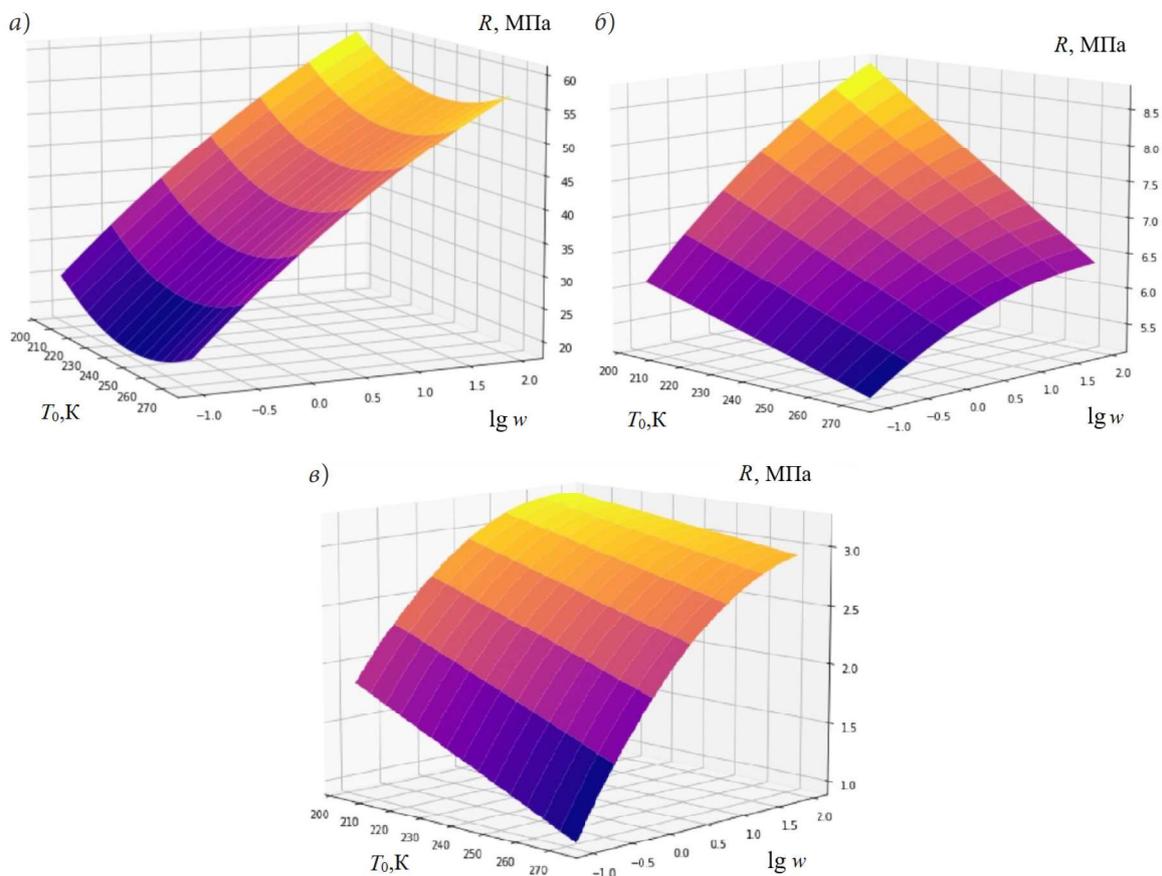


Рис. 4. Взаимосвязь прочности, скорости и начальной температуры испытания при сжатии LVL: а — в продольном направлении; б — в тангенциальном направлении; в — в радиальном направлении

Таким образом, при сжатии LVL с нестационарной теплопередачей в целом может быть подтверждена справедливость термофлуктуационного механизма разрушения во всех главных направлениях анизотропии. Однако для прогнозирования долговечности материала и несущей способности LVL-конструкций при кратковременном и длительном действии нагрузок с учетом изменяющихся температурно-влажностных условий среды необходимо дальнейшее исследование. В частности, требуется дать обоснование снижению прочности при сжатии вдоль волокон с отрицательными температурами средней интенсивности.

### Выводы

1. Предложена модель оттаивания LVL, позволяющая считать значения температуры, измеренные пирометром на поверхности образца, осредненными значениями по всем точкам его объема. Ограничениями предложенной модели являются временной интервал от 0 до 75 мин и температурный интервал от 203 до 293 К.

2. На основе предложенной модели оттаивания проведены механические испытания LVL, результаты которых подтверждают зависимость деформаций и прочности при сжатии с нестационарной теплопередачей (т. е. в условиях оттаивания) в главных направлениях анизотропии от начальной температуры и скорости испытания.

3. С понижением начальной температуры оттаивания при сжатии LVL вдоль волокон от 0 до  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (от 273 до 203 К) выявлено, что

- прочность при скорости нагружения 2 мм/мин выше до 25 %, максимальные деформации больше на 0,1 мм (до 6 %);
- прочность при скорости нагружения 20 мм/мин выше до 25 %, максимальные деформации больше на 0,8 мм (до 30 %);
- прочность при скорости нагружения 0,2 мм/мин выше до 8 %, максимальные деформации больше на 0,1 мм (до 6 %).

4. С понижением начальной температуры оттаивания при сжатии LVL в тангенциальном направлении от 0 до  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (от 273 до 203 К) выявлено, что

- прочность при скорости нагружения 2 мм/мин выше до 21 %, максимальные деформации меньше на 1,0 мм (до 25 %);
- прочность при скорости нагружения 20 мм/мин выше до 24 %, максимальные деформации меньше на 1,0 мм (до 26 %);
- прочность при скорости нагружения 0,2 мм/мин выше до 7 %, максимальные деформации меньше на 0,5 мм (до 15 %).

5. С понижением начальной температуры оттаивания при сжатии LVL в радиальном направлении от 0 до  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (от 273 до 203 К) выявлено, что

- прочность при скорости нагружения 2 мм/мин выше до 17 %, максимальные деформации больше на 0,04 мм (до 2 %);
- прочность при скорости нагружения 20 мм/мин выше до 10 %, максимальные деформации не менялись;
- прочность при скорости нагружения 0,2 мм/мин выше до 35 %, максимальные деформации больше на 0,2 мм (до 11 %).

6. На основе полученных экспериментальных данных предложена общая зависимость прочности LVL при сжатии с нестационарной теплопередачей в главных направлениях анизотропии от начальной температуры и скорости испытания в виде полинома второй степени. Выявлено, что при сжатии в радиальном и тангенциальном направлениях функция прочности LVL  $R_c^{np}[T_0; \lg w]$  возрастает с увеличением скорости нагружения и снижением начальной температуры оттаивания, а при сжатии в продольном направлении функция описывается седловидной поверхностью и имеет минимум в области  $T_0 = -35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Библиографический список

1. Бойко М. Д. Влияние температурно-влажностного состояния древесины на ее прочность. Л.; М.: Госстройиздат, 1952. 96 с.

2. *Елхин А. Н.* Влияние отрицательных температур на механические свойства древесины сосны при различной влажности ее: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 1954. 390 с.
3. *Фоломин А. И.* Влияние замораживания древесины сосны на предел ее прочности при сжатии вдоль волокон // Сб. тр. М., 1953. С. 50–57.
4. *Панфилов В. С.* Испытания древесины и фанеры, подвергшихся воздействию низких температур. М.: Лесстехиздат, 1934. 45 с.
5. *Kollmann F.* Die mechanischen Eigenschaften verschiedenen feuchter Hölzen im Temperaturbereich von  $-200$  bis  $+200$  °C // VDI-Forschungsheft. 1940. № 403. S. 1–18.
6. *Thunell B.* Temperaturs inverkan på böjhallfastheten hos svenskt furuvirke // Statens Provningsanstalts Medd, Stockholm. 1940. № 80.
7. *Thunell B.* Volymviktens, fuktighetschiltens och temperaturs inverkan på slaghallfastheten hos svenskt furuvirke // Statens Provningsanstalts Medd., Stockholm, 1941. № 81.
8. *Vorreiter L.* Biege- und Druckfestigkeit gefrorenen Fichtenholzes // Tharandter forstliches Jahrbuch. Bd. 1938. № 89. S. 491–510.
9. *Тутурин С. В.* Механическая прочность древесины: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 318 с.
10. *Денеш Н. Д.* Экспериментальное исследование влияния охлаждения пиломатериала на его жесткость и прочность при изгибе // Лесной журнал. 1986. № 3. С. 115–117.
11. *Горбачева Г. А.* Разработка методики экспериментального исследования термомеханических деформаций древесины при изгибе // Технология и оборудование для переработки древесины: науч. тр. МГУЛ. М., 2000. Вып. 312. С. 12–15.
12. *Иванов Ю. М.* Учет влияния температуры в расчетах деревянных конструкций // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1981. № 11. С. 13–18.
13. *Иванов Ю. М.* Влияние размеров элементов на прочность конструкции при изгибе // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1994. № 1. С. 62–66.
14. *Wang X. A., Hagman O., Sundqvist B., Ormarsson S., Wan H., Niemz P.* Impact of cold temperatures on the shear strength of Norway spruce joint glued with different adhesives // European Journal of Wood and Wood Products. 2015. Vol. 73 (2). Pp. 225–233.
15. *Wang X., Hagman O., Sundqvist B., Ormarsson S., Wan H., Niemz P.* Shear strength of Scots pine wood and glued joints in a cold climate // BioResources. 2016. Vol. 11 (1). Pp. 944–956.
16. *Чахов Д. К., Винокуров А. А.* Особенности изучения влияния низких температур на технологические свойства КФС и прочность КДК на их основе // Строительный комплекс Востока России. Проблемы, перспективы, кадры: тез. докл. межрегиональной науч.-практ. конф. Улан-Удэ: ВСГТУ, 1999. С. 148–152.
17. *Винокуров А. А., Иванов В. С.* К вопросу об исследовании прочности склеивания древесины местного произрастания // Новое тысячелетие — новые идеи — новое поколение: сб. науч. тр. форума студентов РС (Якутия). Якутск: ЯГУ, 2001. С. 46–48.
18. *Винокуров А. А., Иванов В. С.* Определение морозостойкости клеевых соединений древесины на основе современных синтетических клеев // Лаврентьевские чтения Республики Саха (Якутия): науч. конф. студентов и молодых ученых. Якутск, 2001. С. 16–17.
19. *Буслаев Ю. Н.* Исследование влияния отрицательной температуры и влаги на долговечность клееных элементов деревянных конструкций (на примере Центральной Якутии): дис. ... канд. техн. наук. Л., 1982. 228 с.
20. *Журков С. Н., Томашевский Э. Е.* Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения // Некоторые проблемы прочности твердого тела. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 68–75.
21. *Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
22. *Бартнев Г. М., Зув Ю. С.* Прочность и разрушение высокоэластических материалов. М.; Л.: Химия, 1964. 388 с.
23. *Бартнев Г. М.* Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия, 1984. 280 с.
24. *Ратнер С. Б., Ярцев В. П.* Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? М.: Химия, 1992. 320 с.
25. *Потапова Л. Б., Ярцев В. П.* Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения? М.: Машиностроение-1, 2005. 244 с.
26. *Ярцев В. П., Антипов Д. В.* Прочность и долговечность клеедеревянных балок с учетом влажности, температуры и времени эксплуатации // Вестник ТГТУ. 2011. Т. 17, № 3. С. 780–789.
27. *Черных А. Г., Рыбнов Е. И., Сенькин Н. А. [и др.].* Исследование работы металлических и деревянных конструкций и оценка срока их службы с учетом условий эксплуатации. СПб.: СПбГАСУ, 2022. 356 с.
28. *Коваль П. С.* Ускоренный метод определения длительной прочности древесины и материалов на ее основе // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 6 (107). С. 68–80.

29. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1978. 224 с.

30. Ашкенази Е. К., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1980. 247 с.

31. Cao K., Lesnic D., Colaco M. J. Determination of thermal conductivity of inhomogeneous orthotropic materials from temperature measurements // *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2019. Vol. 27 (10). Pp. 1372–1398.

32. Титунин А. А., Каравайков В. М., Сироткина К. В. Теплопроводность деревянных клееных конструкций // *Строительные материалы*. 2007. № 10. С. 64–66.

33. Черных А. Г., Глухих В. Н., Коваль П. С., Данилов Е. В., Корольков Д. И., Трунина Ю. В. Сравнительный анализ результатов определения длительной прочности древесины и LVL ускоренным методом при сжатии вдоль волокон // *Вестник Евразийской науки*. 2023. Т. 15, № 6. 16 с.

34. Черных А. Г., Симонова Я. Е., Трунина Ю. В., Посторонко Н. К. К определению предела кратковременной прочности LVL при сжатии поперек волокон перпендикулярно плоскости листа // *Вестник Евразийской науки*. 2024. Т. 16, № 6. 13 с.

35. Коваль П. С., Трунина Ю. В. Совместное влияние влажности и температуры на прочность LVL // *Вестник Евразийской науки*. 2024. Т. 16, № 5. 10 с.

36. Трунина Ю. В. Экспериментальное исследование влияния отрицательных температур на прочность и деформации LVL // *Перспективы применения цифровых технологий в науке и образовании: сб. науч. тр. Казань: ООО «Базис», 2024. С. 106–111.*

37. Кладов М. Ю., Ермоченков М. Г. Исследование кинетических параметров механодеструкции композиционных материалов // *Технология и оборудование для переработки древесины: научн. тр. МГУЛ. М., 2005. Вып. 331. С. 193–202.*

38. Кладов М. Ю. Взаимосвязь между кинетическими параметрами термодеструкции и механодеструкции полимерных композиционных материалов при совместных тепловых и механических нагрузениях // *Технология и оборудование для переработки древесины: научн. тр. МГУЛ. М., 2006. Вып. 342. С. 151–163.*

39. Кладов М. Ю. Кинетика разрушения композиционных материалов при совместных тепловых и механических нагрузениях // *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*. М.: МГУЛ, 2006. Вып. 6. С. 13–23.

40. Федосов С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ПресСто, 2010. 364 с.

41. Федосов С. В., Котлов В. Г., Иванова М. А. Влияние динамики тепломассопереноса на характеристики эксплуатации нагельного соединения // *Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. конф. «Первые Международные Лыковские научные чтения, посв. 105-летию акад. А. В. Лыкова»*. Москва, 22–23 сентября 2015 г. Курск: Университетская книга, 2015. С. 262–269.

42. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 536 с.

## References

1. Boyko M. D. *Vliyanie temperaturno-vlazhnostnogo sostoyaniya drevesiny na ee prochnost'* [Influence of temperature-humidity state of wood on its strength]. Leningrad, Moscow, Gosstroyizdat, 1952, 96 p.

2. Elkhin A. N. *Vliyanie otritsatel'nykh temperatur na mekhanicheskie svoystva drevesiny sosny pri razlichnoy vlazhnosti ee*. Diss. kand. tekhn. nauk [Influence of negative temperatures on mechanical properties of pine wood at different moisture content. PhD in Sci. Tech. diss.]. Omsk, 1954, 390 p.

3. Folomin A. I. *Vliyanie zamorazhivaniya drevesiny sosny na predel ee prochnosti pri szhatii vdol' volokon* [Influence of pine tree wood freezing on its compressive strength along the fibers]. Coll. sci. works. Moscow, 1953, pp. 50–57.

4. Panfilov V. S. *Ispytaniya drevesiny i fanery, podvergshikhsya vozdeystviyu nizkikh temperatur* [Tests of wood and plywood exposed to low temperatures]. Moscow, Goslestekhzdat, 1934, 45 p.

5. Kollmann F. Die mechanischen Eigenschaften verschiedenen feuchter Hölzen im Temperaturbereich von –200 bis +200 °C. *VDI-Forschungsheft*, 1940, no. 403, pp. 1–18.

6. Thunell B. Temperaturens inverkan på böjhallfastheten hos svenskt furuvirke. *Statens Provningsanstalts Medd.*, Stockholm, 1940, no. 80.

7. Thunell B. Volymviktens, fuktighetschlens och temperaturens inverkan på slaghallfastheten hos svenskt furuvirke. *Statens Provningsanstalts Medd.*, Stockholm, 1941, no. 81.

8. Vorreiter L. Biege- und Druckfestigkeit gefrorenen Fichtenholzes. *Tharandter forstliches Jahrbuch*, Bd. 1938, no. 89, pp. 491–510.

9. Tuturin S. V. *Mekhanicheskaya prochnost' drevesiny*. Disc. dokt. tekhn. nauk [Mechanical strength of wood. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2005, 318 p.

10. Denesh N. D. *Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya okhlazhdeniya pilomateriala na ego zhestkost'*

*i prochnost' pri izgibe* [Experimental study of the effect of cooling of lumber on its stiffness and bending strength]. *Lesnoy zhurnal – Forestry Journal*, 1986, no. 3, pp. 115–117.

11. Gorbacheva G. A. *Razrabotka metodiki eksperimental'nogo issledovaniya termomekhanicheskikh deformatsiy drevesiny pri izgibe* [Development of the methodology of experimental research of thermo-mechanical deformations of wood at bending]. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny. Trudy MGUL* [Technology and equipment for wood processing. Proceedings of the MGUL]. Moscow, 2000, iss. 312, pp. 12–15.

12. Ivanov Yu. M. *Uchet vliyaniya temperatury v raschetakh derevyannykh konstruksiy* [Accounting for the influence of temperature in calculations of wooden structures]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura – News of Universities. Construction and Architecture*, 1981, no. 11, pp. 13–18.

13. Ivanov Yu. M. *Vliyanie razmerov elementov na prochnost' konstruksii pri izgibe* [Influence of element sizes on the structure strength at bending]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – News of higher educational institutions. Forestry Journal*, 1994, no. 1, pp. 62–66.

14. Wang X. A., Hagman O., Sundqvist B., Ormarsson S., Wan H., Niemz P. Impact of cold temperatures on the shear strength of Norway spruce joint glued with different adhesives. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2015, vol. 73 (2), pp. 225–233.

15. Wang X., Hagman O., Sundqvist B., Ormarsson S., Wan H., Niemz P. Shear strength of Scots pine wood and glued joints in a cold climate. *Bio Resources*, 2016, vol. 11 (1), pp. 944–956.

16. Chakhov D. K., Vinokurov A. A. *Osobennosti izucheniya vliyaniya nizkikh temperatur na tekhnologicheskie svoystva KFS i prochnost' KDK na ikh osnove* [Features of studying the effect of low temperatures on the technological properties of CFS and strength of KDK on their basis]. *Stroitel'nyi kompleks Vostoka Rossii. Problemy, perspektivy, kadry: Trudy mezhhregional'noy nauch.-prakt. konf. Tezisy dokladov* [Construction complex of the East of Russia. Problems, prospects, personnel. Proceedings of the Inter-regional sci.-pract. conf. Theses of reports]. Ulan-Ude, VSGTU Publ., 1999, pp. 148–152.

17. Vinokurov A. A., Ivanov V. S. *K voprosu ob issledovanii prochnosti skleivaniya drevesiny mestnogo proizrastaniya* [To the question of research of gluing strength of wood of local growth]. *Novoe tysyacheletie – novye idei – novoe pokolenie. Trudy nauchn. tr. foruma studentov RS (Ya)* [New Millennium - New Ideas - New Generation. Proceedings of the sci. forum of students of RS (Ya)]. Yakutsk, YaGU Publ., 2001, pp. 46–48.

18. Vinokurov A. A., Ivanov V. S. *Opreделение morozostoykosti kleevykh soedineniy drevesiny na osnove sovremennykh sinteticheskikh kleev* [Determination of frost resistance of wood glue joints on the basis of modern synthetic glues]. *Lavrent'evskie chteniya Respubliki Sakha (Yakutiya). Trudy nauch. konf. studentov i molodykh uchenykh RS (Ya)* [Lavrentiev Readings of the Republic of Sakha (Yakutia). Proceedings of the sci. conf. of students and young scientists (Ya)]. Yakutsk, 2001, pp. 16–17.

19. Buslaev Yu. N. *Issledovanie vliyaniya otritsatel'noy temperatury i vlagi na dolgovechnost' kleevykh elementov derevyannykh konstruksiy (na primere Tsentral'noy Yakutii). Diss. kand. tekhn. nauk* [Research of the influence of negative temperature and moisture on the durability of glued elements of wooden structures (on the example of Central Yakutia)]. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1982, 228 p.

20. Zhurkov S. N., Tomashevskiy E. E. *Vremennaya zavisimost' prochnosti pri razlichnykh rezhimakh nagruzheniya* [Time dependence of strength under different loading modes]. *Nekotorye problemy prochnosti tverdogo tela* [In: Some problems of solid state strength]. Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 1959, pp. 68–75.

21. Regel' V. R., Slutsker A. I., Tomashevskiy E. E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [Kinetic nature of the strength of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 560 p.

22. Bartenev G. M., Zuev Yu. S. *Prochnost' i razrushenie vysokoelasticheskikh materialov* [Strength and fracture of highly elastic materials]. Moscow, Leningrad, Khimiya Publ., 1964, 388 p.

23. Bartenev G. M. *Prochnost' i mekhanizm razrusheniya polimerov* [Strength and fracture mechanism of polymers]. Moscow, Khimiya, 1984, 280 p.

24. Ratner S. B., Yartsev V. P. *Fizicheskaya mekhanika plastmass. Kak prognoziryuyut rabotosposobnost'?* [Physical mechanics of plastics. How to predict the workability?]. Moscow, Khimiya Publ., 1992, 320 p.

25. Potapova L. B., Yartsev V. P. *Mekhanika materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii. Kak prognoziryuyut predel'nye napryazheniya?* [Mechanics of Materials under Complex Stress State. How limit stresses are predicted?]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2005, 244 p.

26. Yartsev V. P., Antipov D. V. *Prochnost' i dolgovechnost' kleederevyannykh balok s uchetom vlazhnosti, temperatury i vremeni ekspluatatsii* [Strength and durability of glued-wood beams taking into account humidity, temperature and time of operation]. *Vestnik TGTU – Bulletin of TSTU*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 780–789.

27. Chernykh A. G., Rybnov E. I., Sen'kin N. A. *Issledovanie raboty metallicheskikh i derevyannykh konstruksiy i otsenka sroka ikh sluzhby s uchetom usloviy ekspluatatsii* [Investigation of metal and wooden structures

and estimation of their service life with consideration of operating conditions]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2022, 356 p.

28. Koval' P. S. *Uskorenniy metod opredeleniya dlitel'noy prochnosti drevesiny i materialov na ee osnove* [Accelerated method of determination of long-term strength of wood and materials on its basis]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2024, no. 6 (107), pp. 68–80.

29. Ashkenazi E. K. *Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov* [Anisotropy of wood and wood-based materials]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978, 224 p.

30. Ashkenazi E. K., Ganov E. V. *Anizotropiya konstruktivnykh materialov* [Anisotropy of structural materials]. 2-nd ed., revised. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980, 247 p.

31. Cao K., Lesnic D., Colaco M. J. Determination of thermal conductivity of inhomogeneous orthotropic materials from temperature measurements. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2019, vol. 27 (10), pp. 1372–1398.

32. Titunin A. A., Karavaykov V. M., Sirotkina K. V. *Teploprovodnost' derevyannykh kleenykh konstruktсий* [Thermal conductivity of wooden glued structures]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2007, no. 10, pp. 64–66.

33. Chernykh A. G., Glukhikh V. N., Koval' P. S., Danilov E. V., Korol'kov D. I., Trunina Yu. V. *Sravnitel'nyy analiz rezul'tatov opredeleniya dlitel'noy prochnosti drevesiny i LVL uskorennyy metodom pri szhatii vdol' volokon* [Comparative analysis of the results of determination of long-term strength of wood and LVL by accelerated method in compression along the fibers]. *Vestnik Evraziyskoy nauki – Bulletin of Eurasian Science*, 2023, vol. 15, no. 6, 16 p.

34. Chernykh A. G., Simonova Ya. E., Trunina Yu. V., Postoronko N. K. *K opredeleniyu predela kratkovremennoy prochnosti LVL pri szhatii poperek volokon perpendikulyarno ploskosti lista* [To determination of short-term strength limit of LVL under compression across fibers perpendicular to the plane of the sheet]. *Vestnik Evraziyskoy nauki – Bulletin of Eurasian Science*, 2024, vol. 16, no. 6, 13 p.

35. Koval' P. S., Trunina Yu. V. *Sovmestnoe vliyaniye vlazhnosti i temperatury na prochnost' LVL* [Joint influence of humidity and temperature on the strength of LVL]. *Vestnik Evraziyskoy nauki – Bulletin of Eurasian Science*, 2024, vol. 16, no. 5, 10 p.

36. Trunina Yu. V. *Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya otritsatel'nykh temperatur na prochnost' i deformatsii LVL* [Experimental study of the influence of negative temperatures on the strength and deformations of LVL]. *Perspektivy primeneniya tsifrovyykh tekhnologiy v nauke i obrazovanii. Sb. nauch. tr.* [Prospects of application

of digital technologies in science and education. Coll. sci. works]. Kazan, Bazis Publ., 2024, pp. 106–111.

37. Kladov M. Yu., Ermochenkova M. G. *Issledovanie kineticheskikh parametrov mekhanodestruktsii kompozitsionnykh materialov* [Investigation of kinetic parameters of mechanodestruction of composite materials]. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny. Trudy MGUL* [Technology and equipment for wood processing. Proceedings of MGUL] Moscow, 2005, iss. 331, pp. 193–202.

38. Kladov M. Yu. *Vzaimosvyaz' mezhdu kineticheskimi parametrami termodestruktsii i mekhanodestruktsii polimernykh kompozitsionnykh materialov pri sovmestnykh teplovykh i mekhanicheskikh nagruzheniyakh* [Interrelation between kinetic parameters of thermodestruction and mechanodestruction of polymer composite materials under joint thermal and mechanical loading]. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny. Trudy MGUL* [Technology and equipment for wood processing. Proceedings of MGUL]. Moscow, 2006, iss. 342, pp. 151–163.

39. Kladov M. Yu. *Kinetika razrusheniya kompozitsionnykh materialov pri sovmestnykh teplovykh i mekhanicheskikh nagruzheniyakh* [Fracture kinetics of composite materials under combined thermal and mechanical loading]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoy vestnik – Bulletin of the Moscow State University of Forestry. Forestry Bulletin*, Moscow, MGUL, 2006, iss. 6, pp. 13–23.

40. Fedosov S. V. *Teplomassoperenos v tekhnologicheskikh protsessakh stroitel'noy industrii* [Thermo-mass transfer in technological processes of building industry]. Ivanovo, PresSto Publ., 2010, 364 p.

41. Fedosov S. V., Kotlov V. G., Ivanova M. A. *Vliyaniye dinamiki teplomassoperenosa na kharakteristiki ekspluatatsii nagel'nogo soedineniya* [Influence of heat and mass transfer dynamics on the characteristics of nail joint operation]. *Aktual'nye problemy sushki i termovlazhnostnoy obrabotki materialov v razlichnykh otraslyakh promyshlennosti i agropromyshlennom komplekse. Trudy nauchn. konf. «Pervye Mezhdunarodnye Lykovskie nauchnye chteniya, posvyashchyonnye 105-letiyu akademika A. V. Lykova»* [Actual problems of drying and thermal-moisture treatment of materials in different industries and agroindustrial complex. Proceedings of the sci. conf. “The first International Lykov Scientific Readings dedicated to the 105th anniversary of academician A. V. Lykov”]. Moscow, September 22–23, 2015. Kursk, Universitetskaya Kniga Publ., 2015, pp. 262–269.

42. Lykov A. V., Mikhaylov Yu. A. *Teoriya tepla i massoperenosa* [Theory of heat and mass transfer]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963, 536 p.