

Учет явления теплопередачи при проектировании нагельных соединений деревянных конструкций

Федосов Сергей Викторович

д-р техн. наук, профессор, президент

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

Котлов Виталий Геннадьевич

канд. техн. наук, доцент, директор Института строительства и архитектуры

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

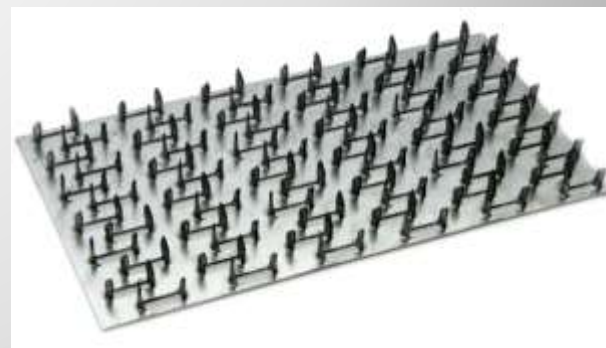
Решаемые задачи

- 1) Разработка физико-математической модели процессов переноса теплоты и влаги в древесине нагельного соединения на основе решения краевых задач, определяемых дифференциальными уравнениями в частных производных параболического типа с соответствующими начальными и граничными условиями;
- 2) Экспериментальное исследование процессов теплопереноса в древесине при циклически меняющемся температурно-влажностном режиме эксплуатации металлического нагеля;

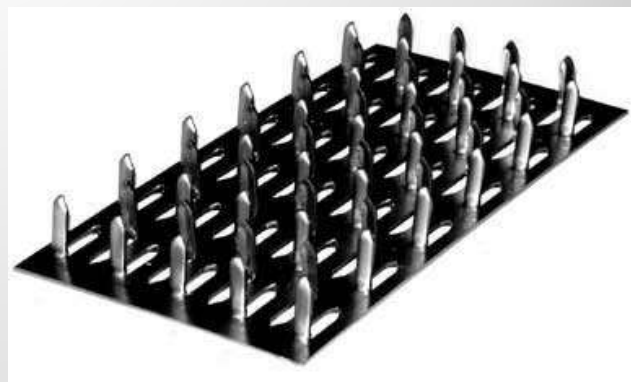
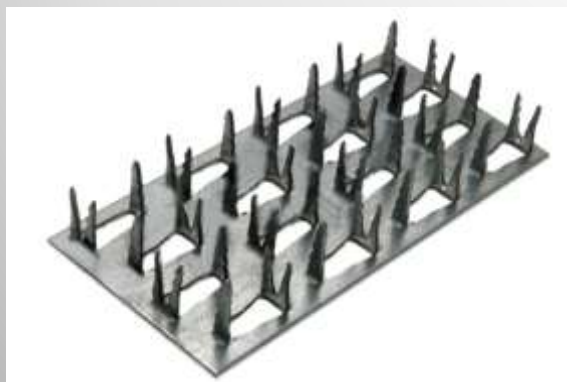
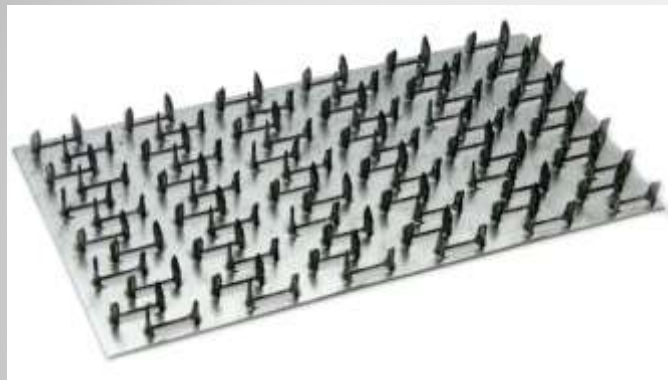
Решаемые задачи

- 3) Экспериментальное исследование влагопереноса при диффузионном увлажнении образцов древесины;
- 4) Создание методологии мониторинга состояния стропильных конструкций и разработка своеобразного «паспорта истории болезни» для целей определения сроков планово-предупредительных ремонтов и мероприятий по их осуществлению.

Вспомогательные детали для соединения элементов деревянных конструкций



Металлические зубчатые пластины (МЗП)



Мансардный этаж здания с деревянными конструкциями с соединениями на МЗП в г. Йошкар-Ола



Мансардный этаж здания с деревянными конструкциями с соединениями на МЗП в г. Нижний Новгород



Наглядное представление влияния температуры на нагельное соединение



Стропильная система учебного корпуса № 2 ФГБОУ ВО «ПГТУ» в г. Йошкар-Ола



Влияние температурно-влажностных параметров среды эксплуатации

На сегодняшний день данные параметры учитываются при расчете коэффициентом m_v .

Класс условий эксплуатации	Эксплуатационная влажность древесины, %	Максимальная влажность воздуха при $t = 20^{\circ}\text{C}$, %	Коэффициент m_v
1a	Не более 8	40	1
1б	Не более 10	50	1
2 (нормальный)	Не более 12	65	0,9
3 (влажный)	Не более 15	75	0,85
4a	Не более 20	85	0,75
4б	Более 20	Более 85	0,75

Значение коэффициента m_v варьируется от 0,75 до 1.

Влияние температурно-влажностных параметров среды эксплуатации

Данный коэффициент m_v учитывается при расчете:

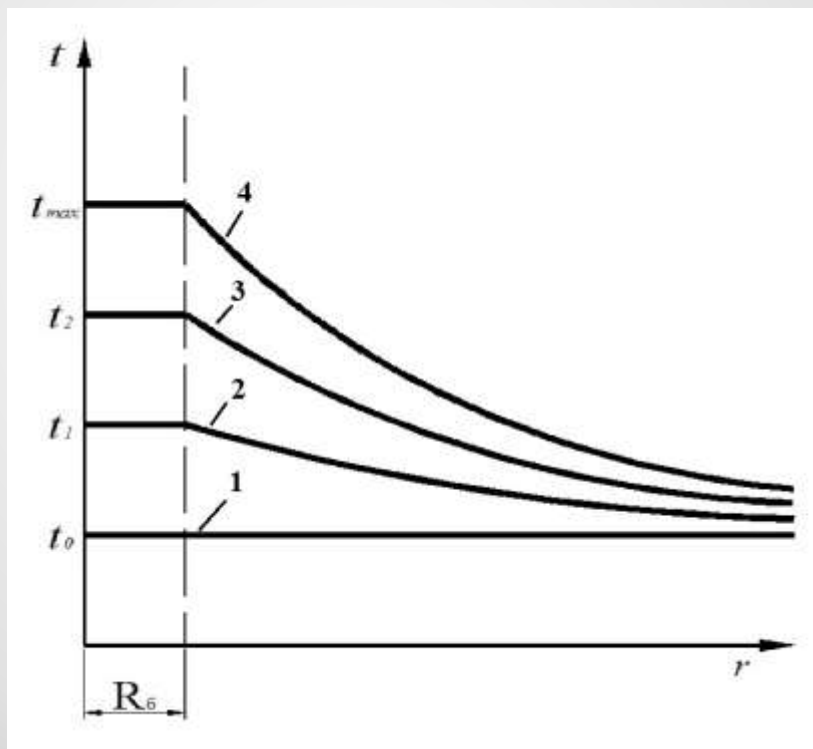
- ✓ По первому предельному состоянию (на прочность): при определении расчетного сопротивления древесины R

$$R = R_{баз} \cdot m_v$$

- ✓ По второму предельному состоянию (на прогиб): при определении деформации деревянной конструкции δ

$$\delta = \delta_{баз} / m_v$$

Графики полей температур в древесине при росте температуры нагеля $t_4 > t_3 > t_2 > t_1$



Графики полей температур в древесине при понижении температуры нагеля $t_5 > t_6 > t_7$

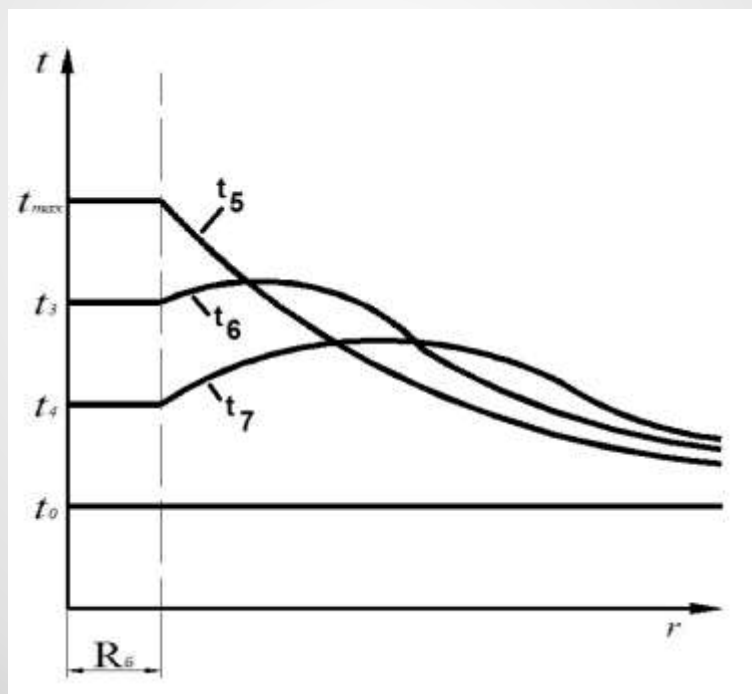
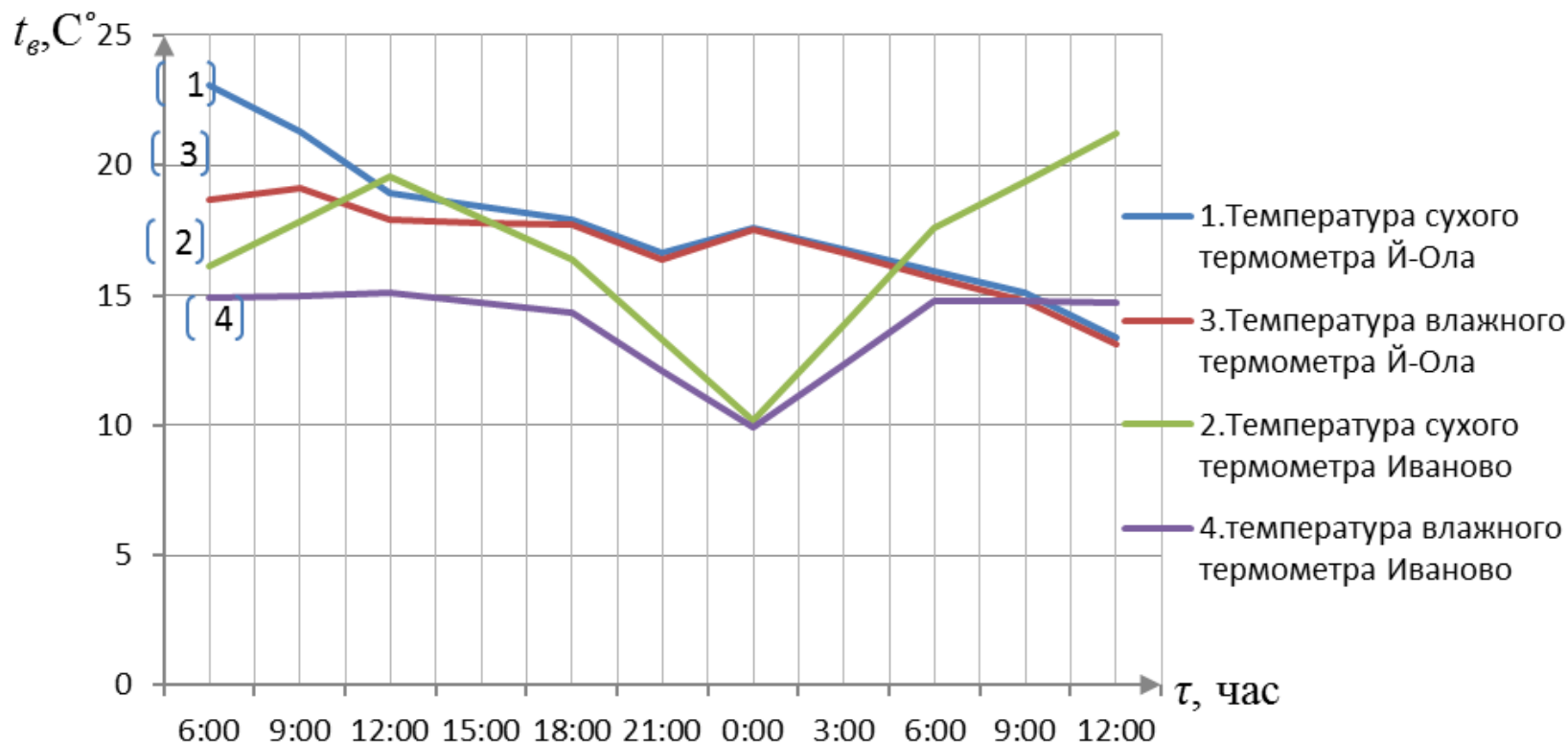
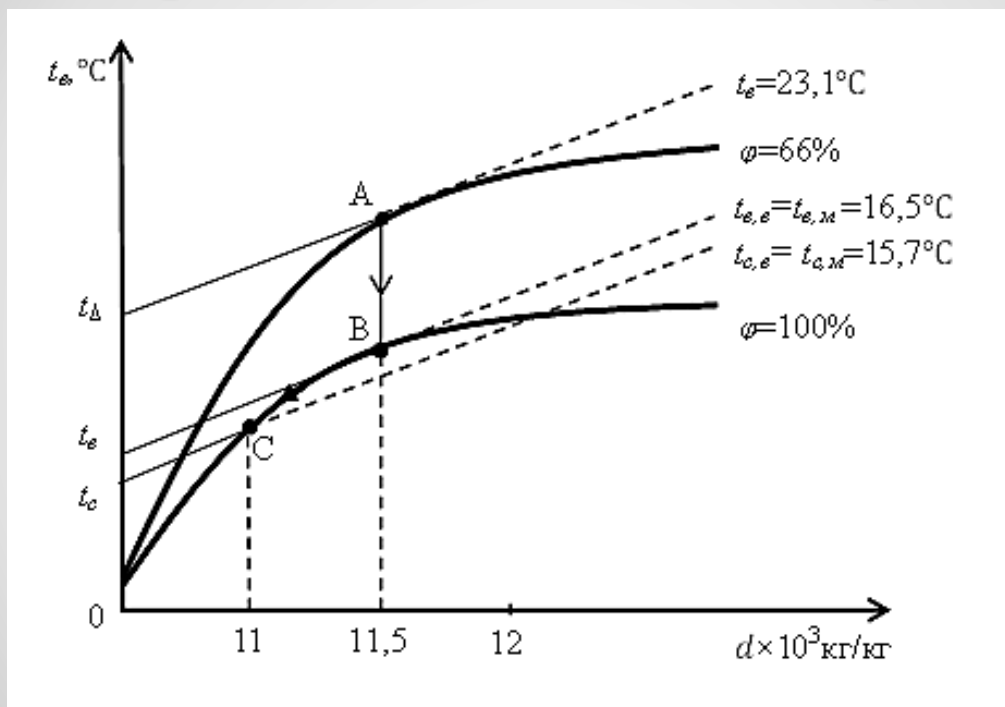


График изменения температур сухого (1,2) и влажного (3,4) термометров для Йошкар-Олы (1,3) и Иваново (2,4)



Изображение процесса охлаждения воздуха на I-d - диаграмме



AB – охлаждение мокрого термометра;

BC – охлаждение по линии $\varphi=100\%$, сопровождаемое конденсацией влаги.

Дифференциальные уравнения тепло-, массо- и баропереноса:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(a \operatorname{grad}(t)) + \varepsilon \cdot \frac{r^*}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(k \operatorname{grad}(u)) + \operatorname{div}(k \delta_T \operatorname{grad}(t)) + \operatorname{div}(k \delta_T \operatorname{grad}(p)) \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} &= \operatorname{div} \left(\frac{\rho_0}{c^*} k \delta_p \operatorname{grad}(p) - \frac{\varepsilon \rho_0}{c^*} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Дифференциальные уравнения невзаимосвязанного тепломассопереноса:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(a \operatorname{grad}(t)) \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(k \operatorname{grad}(u)) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Начальные условия:

$$t(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = t_0(x, y, z) \quad (3)$$

$$u(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = u_0(x, y, z) \quad (4)$$

Граничные условия:

$$\alpha [t_c(\tau) - t(x, y, z, \tau)] = \lambda \nabla t(x, y, z, \tau) + q_m(\tau) r^* \quad (5)$$

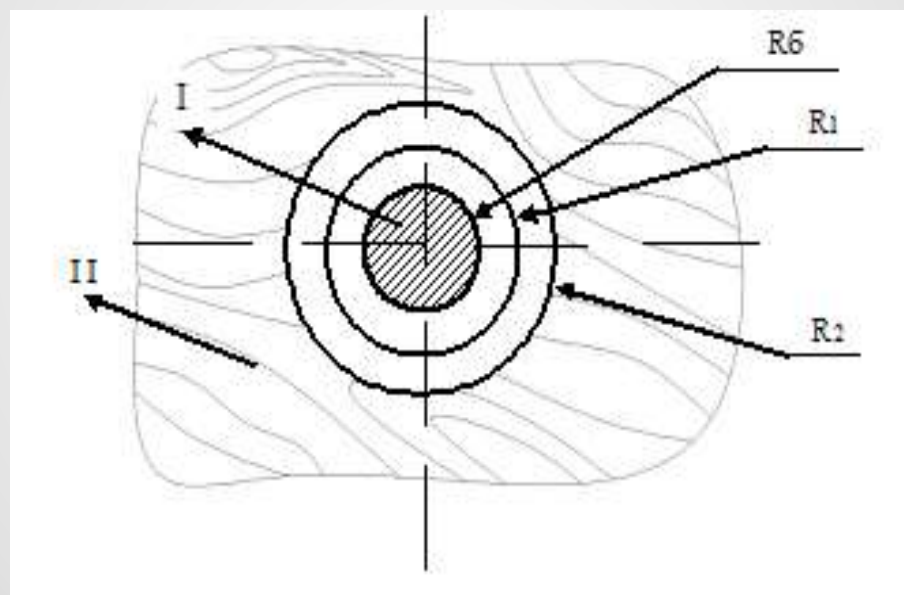
$$q_m(\tau) = \beta [u_{nc}(\tau) - u_c(\tau)] \rho_r = -k \rho_0 [\nabla u(x, y, z, \tau) + \delta_T \nabla t] \quad (6)$$

α, β - коэффициенты тепло- и массоотдачи;

λ, k - коэффициенты тепло – и массопроводности;

r^* - скрытая теплота парообразования.

Представление древесины в виде системы колец (неограниченных пластин)



I — нагель в виде болта; II - древесина

Краевая задача теплопроводности:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2}, \quad r > 0; \quad R_0 \leq r \leq R_1 \quad (7)$$

$$t(r, \tau)|_{\tau=0} = t_{1,0}(r) \quad (8)$$

$$t(r, \tau)|_{r=R_0} = t_{0,1} \quad (9)$$

$$t(r, \tau)|_{r=R_1} = t_{R,1} \quad (10)$$

Безразмерные координаты:

$$T(\bar{r}, Fo) = \frac{t(r, \tau) - t_{R,1}}{t_{\delta,1}}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_1 - R_{\delta}}; \quad Fo = \frac{a\tau}{(R_1 - R_{\delta})^2} \quad (11)$$

Задача в безразмерных координатах:

$$\frac{\partial T(\bar{r}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1 \quad (12)$$

$$T(\bar{r}, Fo) \Big|_{Fo=0} = T_{1,0}(\bar{r}) \quad (13)$$

$$T(\bar{r}, Fo) \Big|_{\bar{r}=0} = T_{R,1} \quad (14)$$

$$T(\bar{r}, Fo) \Big|_{\bar{r}=1} = 0 \quad (15)$$

Решение краевой задачи теплопроводности:

$$\begin{aligned} T(\bar{r}, Fo) = T_{R,1} & \left[(1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\pi n \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \right] + \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\pi n \bar{r}) \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \end{aligned} \quad (16)$$

Краевая задача влажнопроводности:

$$\frac{\partial W(r, \tau)}{\partial \tau} = k_1 \frac{\partial^2 W(r, \tau)}{\partial r^2}, \quad \tau \geq 0; \quad R_0 \leq r \leq R_1 \quad (17)$$

$$W_{or}(r)_{\tau=0} = W_{1,0} \quad (18)$$

$$W(r, \tau)_{r=R_0} = W_n \quad (19)$$

$$W(r, \tau)_{r=R_1} = W_p \quad (20)$$

$$U(\bar{r}, Fo_m) = \frac{W(r, \tau) - W_p}{W_p}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_1 - R_0}; \quad Fo_m = \frac{k_1 \tau}{(R_1 - R_0)^2} \quad (21)$$

$W(r, \tau)$ - функция, определяющая поле влагосодержаний в древесине во времени τ и по координате r ;

W_n, W_p - начальное и равновесное влагосодержание.

Задача в безразмерных координатах:

$$\frac{U(\bar{r}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo_m \geq 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1 \quad (22)$$

$$U(\bar{r}, Fo_m) \Big|_{Fo_m=0} = U_{1.0}(\bar{r}) \quad (23)$$

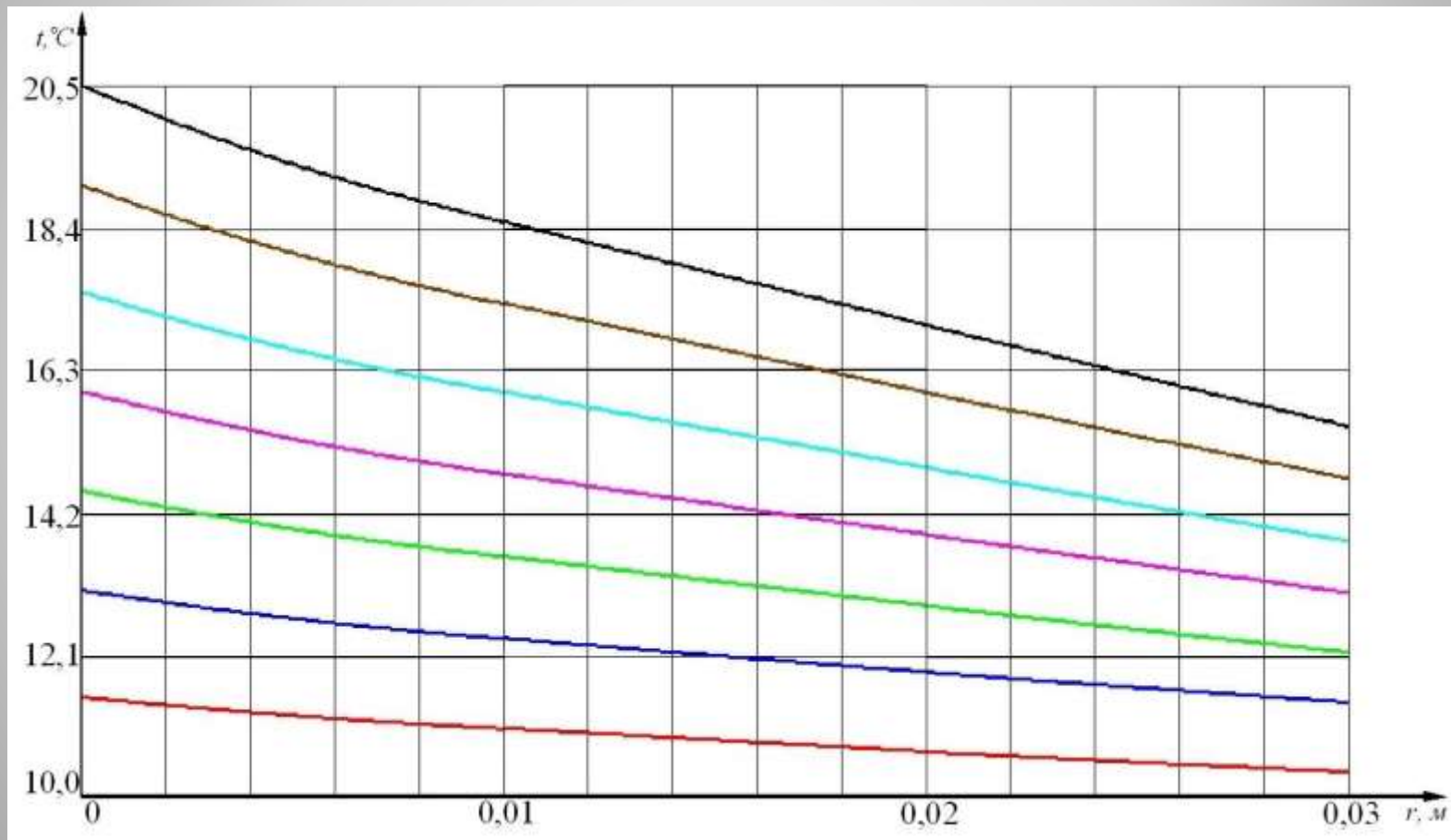
$$U(\bar{r}, Fo_m) \Big|_{\bar{r}=0} = U_h \quad (24)$$

$$U(\bar{r}, Fo_m) \Big|_{\bar{r}=1} = 0 \quad (25)$$

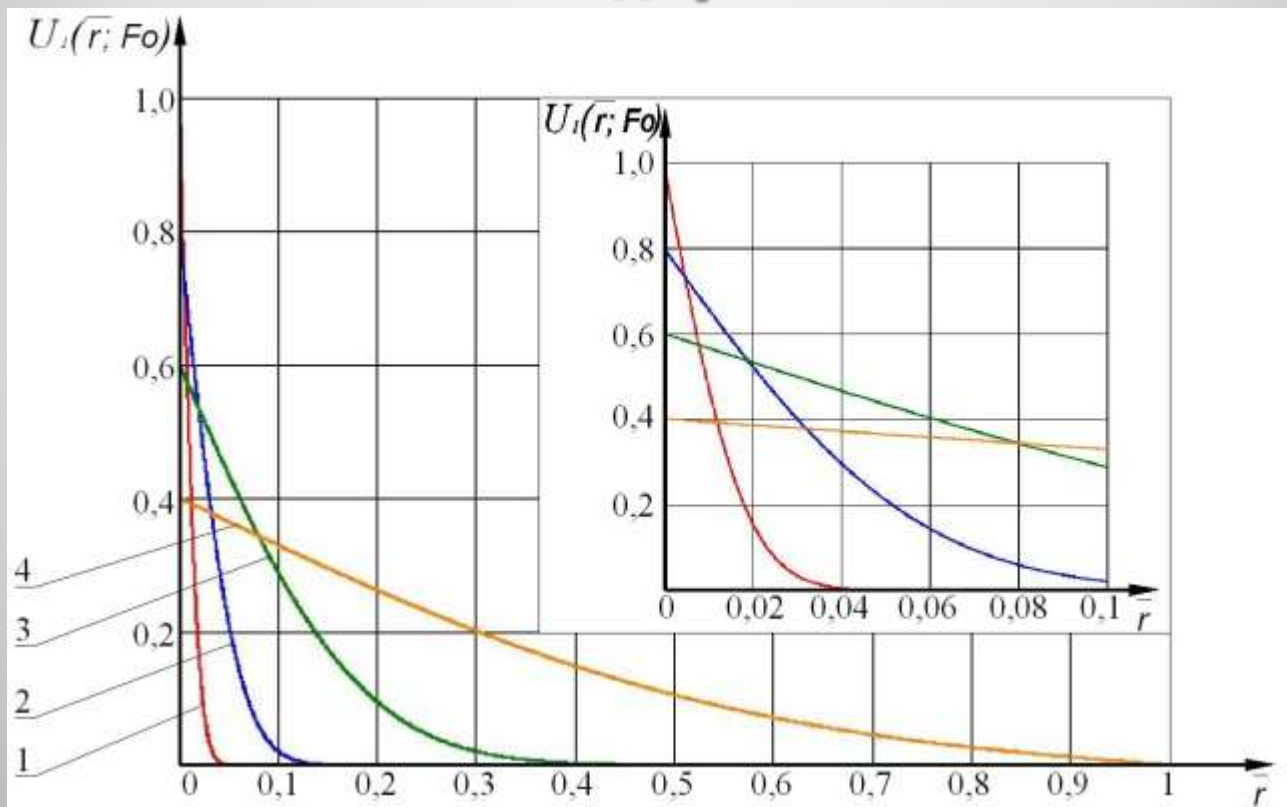
Решение краевой задачи влажнопроводности:

$$U_1(\bar{r}, Fo_m) = U_H \left[(1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{r}) \int_0^1 U_{1.0}(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \quad (26)$$

Прогревание слоев древесины при нагревании нагеля

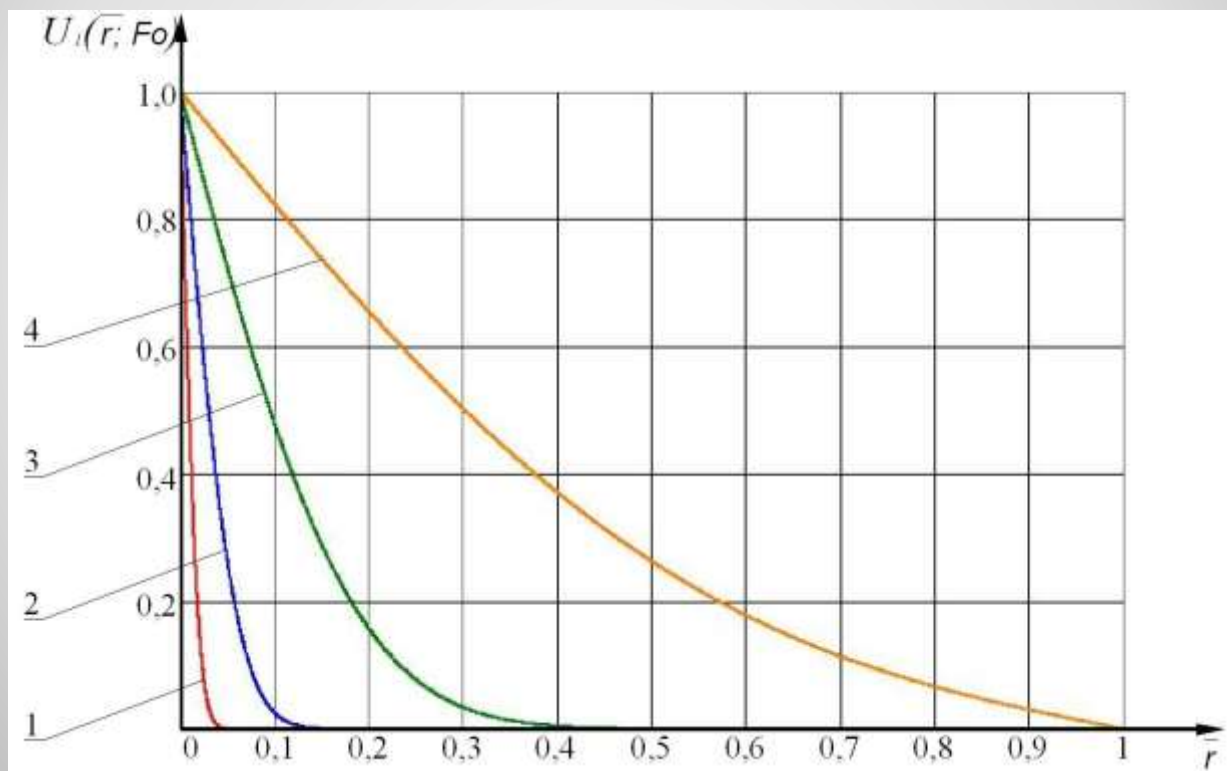


Результаты расчетов по модели массопереноса для случая, когда количество выпавшей влаги меньше максимального гигроскопического влагосодержания



Динамика полей безразмерных влагосодержаний в древесине при массообменном критерии Фурье: 1 – 0,0001; 2 – 0,001; 3 – 0,01; 4 – 0,1

Результаты расчетов по модели массопереноса для случая, когда количество выпавшей влаги больше максимального гигроскопического влагосодержания

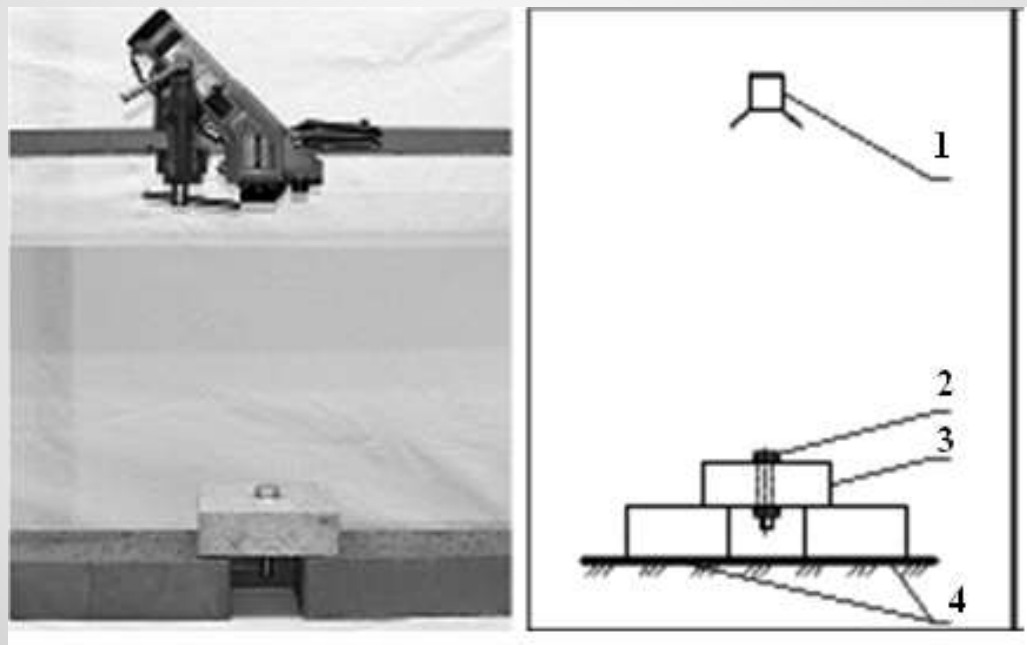


Динамика полей безразмерных влагосодержаний в древесине при массообменном критерии Фурье: 1 – 0,0001; 2 – 0,001; 3 – 0,01; 4 – 0,1

Экспериментальное исследование процессов теплопереноса в древесине

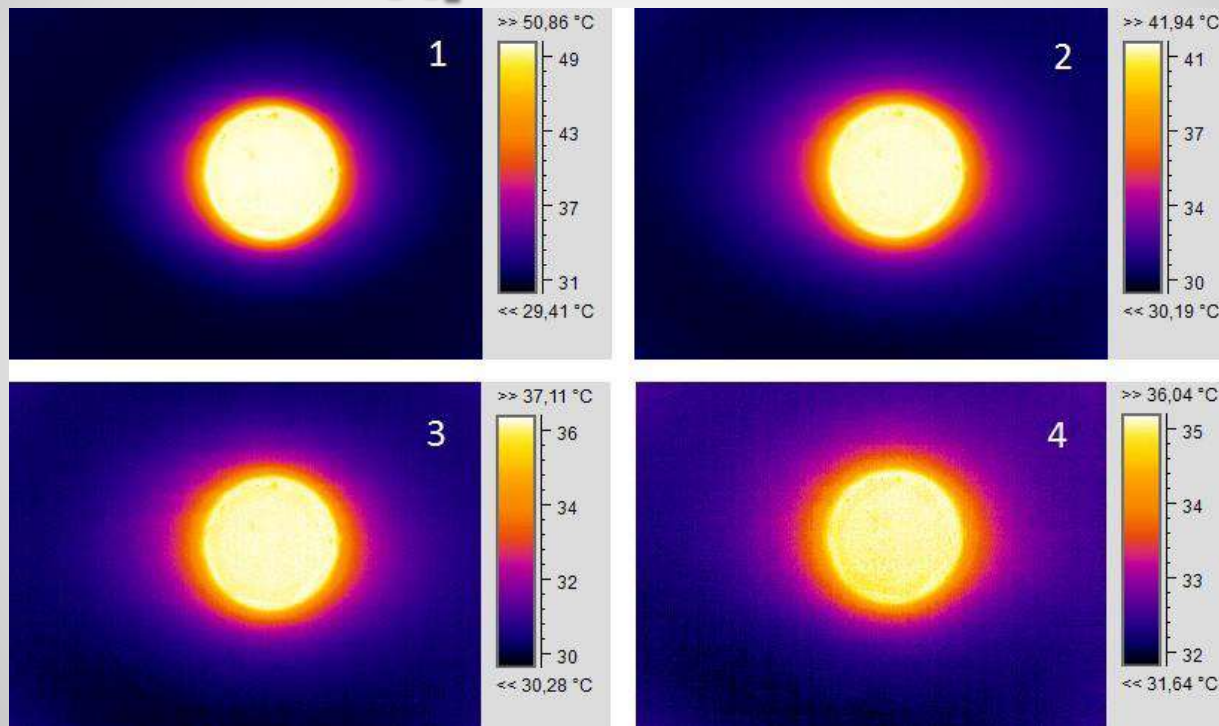
Во время эксперимента моделировался процесс нагрева болта при повышении температуры в чердачном помещении. В предварительно высверленное отверстие в деревянном бруске из древесины сосны помещался стальной болт. Через равные промежутки времени фиксировалось распределение температуры в древесине около болта с помощью тепловизора. Измерения проводились при температуре 26°C и относительной влажности воздуха 65%, шаг измерений 5 мин. Равновесная влажность древесины составляла 11,6%.

Экспериментальное исследование процессов теплопереноса в древесине



1 – тепловизор; 2 – металлический болт; 3 – образец древесины сосны;
4 – опоры

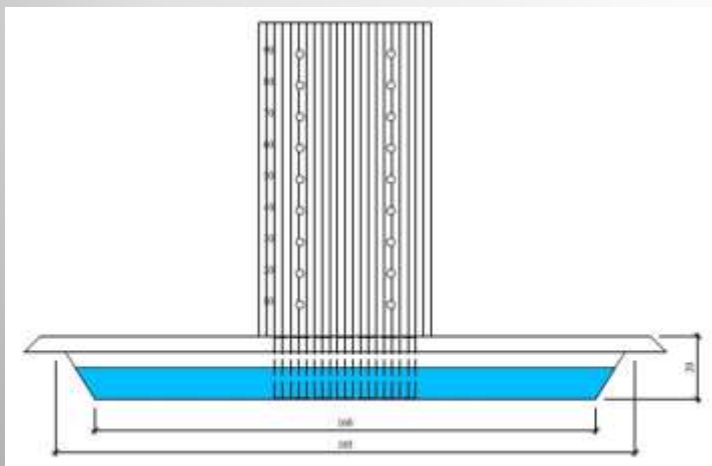
Экспериментальное исследование процессов теплопереноса в древесине



Инфракрасные изображения болтового соединения после нагрева болта
в течение: 1 – 5 мин, 2 – 10 мин, 3 – 20 мин, 4 – 30 мин

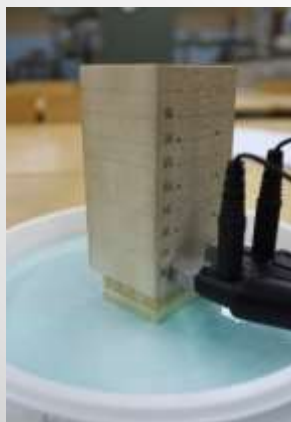
Экспериментальное исследование процессов влагопереноса в древесине

Для этих целей был изготовлен образец из древесины сосны в форме прямоугольной призмы с основанием 45×55 мм и высотой 100 мм вдоль волокон. На одной из поверхностей высверлены отверстия диаметром 2,5 мм и глубиной 18 мм через каждые 10 мм по высоте образца для игл влагомера.

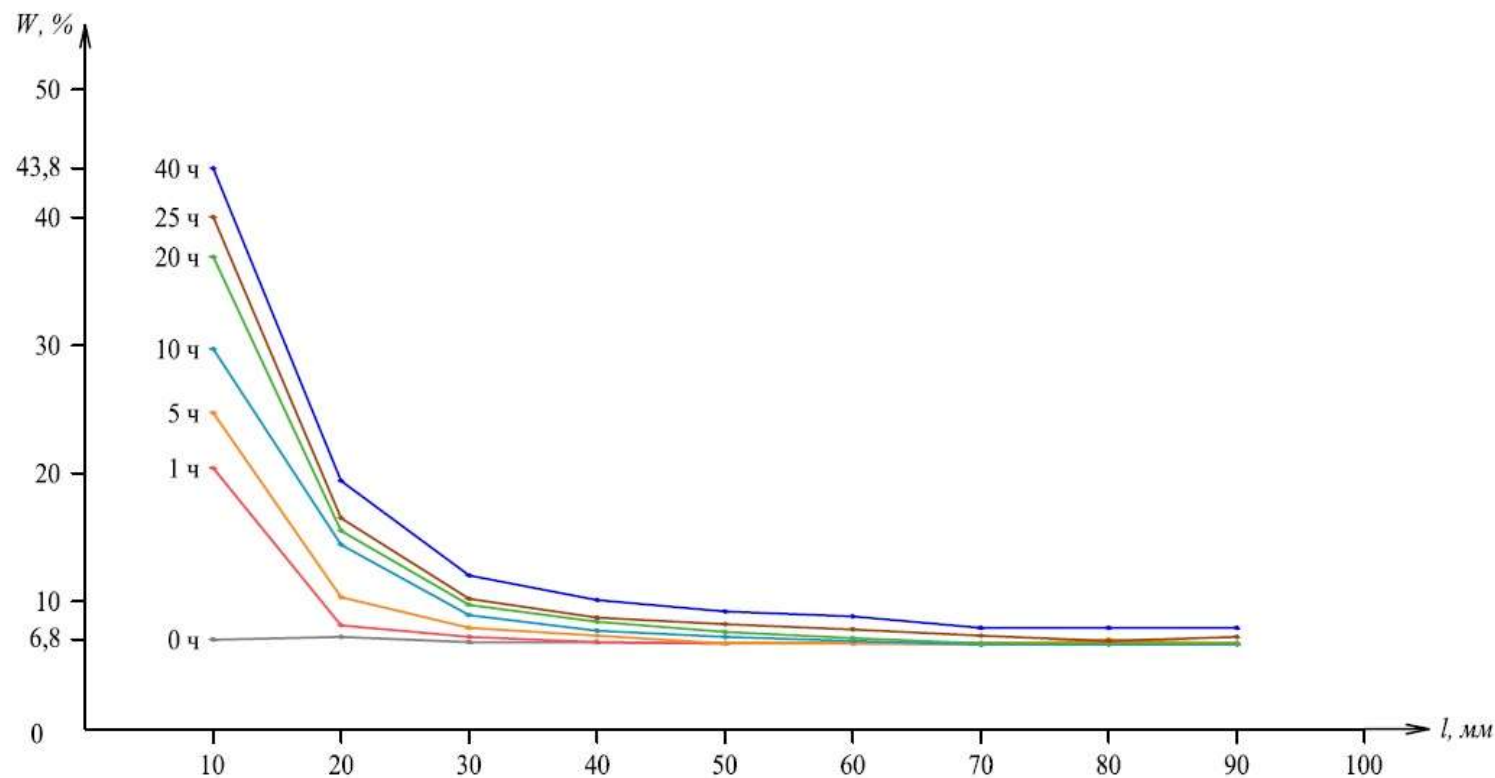


Экспериментальное исследование процессов влагопереноса в древесине

Через определенные промежутки времени с помощью влагомера Hydromette HT 85 (GANN, Германия), оснащенного двумя иглами, производили замеры влажности древесины через каждые 10 мм по высоте образца. На основании показаний температуры (28°C) и относительной влажности воздуха внутри помещения (53%) определили равновесную влажность образца по диаграмме Н.Н. Чулицкого, которая составила 9,2%.



Экспериментальное исследование процессов влагопереноса в древесине



Влажность древесины на расстояниях 10-90 мм от низа образца

Выводы

- 1) Выполненное нами обследование стропильных конструкций зданий промышленного и гражданского назначения показало, что в элементах деревянных конструкций, соединенных металлическим нагелем и работающих в воздушной среде с циклически изменяющимися параметрами в местах контакта нагеля и древесины возникают очаги деструкции и биологического гниения древесины;
- 2) Проведенный анализ деформированного состояния слоев древесины под воздействием нагеля показал, что механическое внедрение нагеля в структуру древесины приводит не только к ее деформационным изменениям, но к изменению теплофизических характеристик, таких как коэффициенты тепло- и температуропроводности, а также коэффициента влажопроводности;

ВЫВОДЫ

- 3) Разработаны физическая и математические модели переноса теплоты и массы вещества в слоях древесины, протекающие при циклических нагреваниях и охлаждениях, сопровождаемых процессами испарения и конденсации влаги;
- 4) Проведено экспериментальное исследование теплопереноса в древесине нагельного соединения, выполненного с помощью болта, в результате которого получены данные о распределении температуры по поверхности древесины около болта. Максимальное изменение температуры древесины происходило на расстоянии 15 мм от поверхности болта. К равновесному температурному состоянию система пришла через 1 час.

Выводы

- 5) Проведено экспериментальное исследование влагопереноса при диффузионном увлажнении образцов древесины сосны. Получены данные о распределении влаги по высоте деревянного элемента в определенные периоды времени. На основе полученных данных определены характеристики массопереноса в материале древесины (равновесная влажность, максимальная гигроскопическая влажность, коэффициент влагопроводности).
- 6) Открыты перспективы для выполнения дальнейших научных изысканий и разработки практических рекомендаций по мониторингу состояния элементов деревянных конструкций.