

АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗУ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

© Соколовський Я., Крошній І., 2012

Сформульовано математичну модель тепломасоперенесення та деформування капілярно-пористих матеріалів під час сушіння. У межах об'єктно-орієнтованого підходу розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для чисельної реалізації отриманої моделі.

Ключові слова: математична модель, програмне забезпечення, капілярно-пористий матеріал, тепломасоперенесення, деревина, метод скінченних елементів.

In the article is formulated a mathematical model of heat and mass transfer and deformation of capillary-porous materials during drying. In the object-oriented approach developed algorithmic and software for numerical realization of the obtained model.

Key words: mathematical model, software, capillary-porous material, heat and mass transfer, wood, finite element method.

Актуальність досліджень

Розроблення математичного та програмного забезпечення автоматизованих систем розрахунку та аналізу фізичних процесів має будуватися на об'єктно-орієнтованому аналізі та проектуванні програмних систем.

У статті з використанням методу скінченних елементів наведена методика чисельного моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів з врахуванням деформування матеріалу та розроблена програмна система для її реалізації з використанням загальнопотокowego програмування.

Аналіз існуючих результатів

Сьогодні побудовані одновимірні математичні моделі пружного і в'язко-пружного деформування деревини [1 – 3]. Застосування числових методів дало змогу розв'язати двовимірні задачі розрахунку напружень в об'ємі висушеної деревини у межах теорії пружності [4, 5]. Побудові математичних моделей неізотермічного вологоперенесення і в'язкопружного стану деревини під час сушіння присвячені праці [6 – 9].

Нині відомо порівняно небагато публікацій з застосування об'єктно-орієнтованого підходу для програмної реалізації МСЕ [1 – 7], в яких запроєктовані класи базових компонентів МСЕ (елементів, вузлів, граничних умов та навантажень). Їх аналіз дає змогу стверджувати про те, що безпосереднє створення об'єктів у програмному коді породжує необхідність перекомпілювання програми для нових даних. Потребує подальшого вдосконалення задача візуального створення та редагування об'єктів шляхом їх інтегрування з генератором розбиття геометричної області. Відсутність явно виділених сутностей зумовлює переписування коду ітераційного процесу та унеможливорює повторне використання програмних кодів.

Математична модель

Сформулюємо математичну модуль визначення розподілу температури $T(X, \tau)$, вологовмісту $U(X, \tau)$, компонент деформацій $\varepsilon_{ij}(X, \tau)$ та напружень $\sigma_{ij}(X, \tau)$ під час сушіння капілярно-пористого матеріалу на прикладі дерев'яного бруса протягом часу $\tau \in [0, \tau_{\text{суш}}]$. Розглядаємо поперечний перетин

матеріалу $\Omega = \{X = (x_1, x_2); x_1 \in [0, l_1], x_2 \in [0, l_2]\}$, центр якого сумісний з початком координат, а осі анізотропії збігаються з координатними осями (l_1, l_2 – геометричні розміри бруса). Систему модельних рівнянь побудовано так.

Для визначення температурних і вологісних полів рівняння тепло- і масоперенесення мають вигляд:

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \varepsilon \rho_0 r \frac{\partial U}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left(a_1 \frac{\partial U}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(a_2 \frac{\partial U}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(a_1 \delta \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(a_2 \delta \frac{\partial T}{\partial x_2} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Початкові умови:

$$U|_{\tau=0} = U_0(x_1, x_2); \quad T|_{\tau=0} = T_0(x_1, x_2). \quad (2)$$

Граничні умови:

$$\begin{aligned} \lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x_i=l_i} + \rho_0 (1 - \varepsilon) \beta_i (U|_{x_i=l_i} - U_p) &= \alpha_i (T_c - T|_{x_i=l_i}), \quad \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x_i=0} = 0; \\ \left(a_i \frac{\partial U}{\partial n} + a_i \delta \frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_{x_i=l_i} &= \beta_i (U_p - U|_{x_i=l_i}), \quad \left(\alpha_i \frac{\partial U}{\partial n} + \alpha_i \delta \frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_{x_i=0} = 0; \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (3)$$

У цьому випадку $T_0(X)$, $U_0(X)$ – початкові розподіли температури та вмісту вологи у матеріалі; $U_p(T_c, \varphi)$ – рівноважна вологість; $c(T, U)$ – теплоємність; $\rho(U)$ – густина; $\lambda_i(T, U)$ і $a_i(T, U)$ – відповідно коефіцієнти теплопровідності і вологопровідності у напрямках анізотропії; ε – коефіцієнт фазового переходу; ρ_0 – базисна густина; r – питома теплота пароутворення; $\delta(T, U)$ – термоградієнтний коефіцієнт; у напрямках анізотропії; $\alpha_i(T_c, v)$ і $\beta_i(T_c, \varphi, v)$ – коефіцієнти відповідно теплообміну і вологообміну; T_c – температура середовища; $\varphi(\tau)$ та $v(\tau)$ – відносна вологість та швидкість руху агента сушіння відповідно; n – вектор зовнішньої нормалі границі області Ω . Початковий розподіл вологовмісту у деревині в періоді нерегулярного режиму процесу сушіння приймається сталим, а в періоді регулярного режиму змінюється за параболічним законом.

Компоненти вектора напружень $\sigma_{ij} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})$ задовольняють рівняння рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} = 0. \quad (4)$$

Граничні умови враховують відсутність зовнішніх зусиль:

$$\sigma_{ij} \Big|_{x_1=l_1, x_2=l_2} = 0. \quad (5)$$

Модельовання в'язкопружних напружень та деформацій у деревині під час сушіння ґрунтується на законах усадки гігроскопічних матеріалів та інтегральних рівняннях спадкової теорії Больцмана-Вольтерра і визначається формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(\tau) &= C_{ij}(T, U) [\varepsilon_{11}(\tau) - \varepsilon_{U1}] - C_{ij}(T, U) \int_0^{\tau} R_{i1}(\tau - s, T, U) [\varepsilon_{11}(\tau) - \varepsilon_{U1}] ds + \\ &+ C_{ij}(T, U) [\varepsilon_{22}(\tau) - \varepsilon_{U2}] - C_{ij}(T, U) \int_0^{\tau} R_{i2}(\tau - s, T, U) [\varepsilon_{22}(\tau) - \varepsilon_{U2}] ds; \end{aligned} \quad (6)$$

де $\varepsilon_U = (\varepsilon_{U1}, \varepsilon_{U2}, \varepsilon_{U3})^T$ – вектор компонент деформацій, які виникають внаслідок зміни температури і вологовмісту; C_{ij} – компоненти тензора пружності анізотропного тіла. Величини ε_{U1} , C_{ij} визначаються за формулами:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{U1} \\ \varepsilon_{U2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \Delta T + \beta_1 \Delta U \\ \alpha_2 \Delta T + \beta_2 \Delta U \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_1 \nu_2} & \frac{\nu_1 E_2}{1 - \nu_1 \nu_2} & 0 \\ \frac{\nu_1 E_2}{1 - \nu_1 \nu_2} & \frac{E_2}{1 - \nu_1 \nu_2} & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix},$$

де ΔT , ΔU – відповідно приріст температури і вологовмісту, $E_i(T, U)$ – модулі Юнга, $\nu_i(T, U)$ – коефіцієнти Пуассона, $\mu(T, U)$ – модуль зсуву.

Функції реологічної поведінки деревини під час сушіння з врахуванням механізму нагромадження незворотних деформацій вибираються у вигляді

$$\varepsilon^*(\tau) = \left[a_0 - \sum_{i=1}^M a_i \exp(-b_i \tau) \right] h(\tau) h(\tau_0 - \tau) - \left[a_0 - \sum_{i=1}^M \alpha_i \exp(-\beta_i (\tau - \tau_0)) \right] h(\tau - \tau_0), \quad (7)$$

де $h(\tau)$ – функція Хевісайда, а невідомі коефіцієнти a_i , b_i , α_i , β_i визначено методом найменших квадратів на основі апроксимації експериментальних даних повзучості зразків деревини під навантаженням та після розвантаження [10].

Для моделювання механіко-сорбційних деформацій, зумовлених швидкістю зміни вологості використано рівняння [11]:

$$\frac{\partial \varepsilon_M}{\partial \tau} = m \sigma \left| \frac{\partial U}{\partial \tau} \right|, \quad (8)$$

де m – параметр моделі. Залежність механіко-сорбційної піддатливості від зміни вологості визначається залежністю

$$J_m = \frac{1}{E_m} (1 - \exp(-\nu_0 m_1 E_m)) + m_2 \nu,$$

де E_m , ν_0 , m_1 , m_2 – параметри моделі, які визначаються за експериментальними дослідженнями.

Для моделювання пластичних властивостей деревини використано теорію пластичного плинину Прандтля – Рейса [12]:

$$de_{ij} = s_{ij} d\lambda + \frac{ds_{ij}}{2\sigma}; \quad d\lambda = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon^{nn}}{H\sigma};$$

$$d\varepsilon^{nn} = \frac{3}{2} \sqrt{d\varepsilon_{ij}^{nn} d\varepsilon_{ij}^{nn}}; \quad H = \frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon^{nn}}; \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}},$$

де e_{ij} , s_{ij} – девіатори деформацій та напружень.

Згідно з законами пластичності [12] можна записати лише співвідношення між диференціалами напружень і деформацій. Тоді запишемо:

$$d\sigma_{ij} = \frac{E}{2(1+\nu)} \left(d\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} d\varepsilon_{ij} - s_{ij} \frac{s_{ke} d\varepsilon_{ke}}{s} \right), \quad s = \frac{2-\nu}{3} \bar{\sigma} \left(1 + \frac{2(1+\nu)}{3E} \right), \quad (9)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера.

Співвідношення (4) – (9) становлять математичну модель в'язкопружного деформування капілярно-пористих матеріалів під час сушіння з врахуванням нагромадження незворотних, зокрема пластичних деформацій.

Чисельне розв'язання математичної моделі (1) – (3)

Для чисельної реалізації моделі тепломасоперенесення використаємо метод скінченних елементів (МСЕ). У подальших викладеннях використовується символіка, властива МСЕ [13]. Також приймаємо, що теплові потоки обумовлені градієнтами тепла $\partial U_1 / \partial \tau$ і вологи $\partial U_2 / \partial \tau$, є незалежні. Тоді

$$\frac{\partial U(\bar{X}, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial U_1(\bar{X}, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial U_2(\bar{X}, \tau)}{\partial \tau}$$

Згідно з основною концепцією МСЕ, запишемо варіаційні функціонали для рівнянь математичної моделі (1) – (3) у матричному вигляді

$$\begin{aligned}\Omega_1(U) &= \frac{1}{2} \int_V \left(\{U\}^T \{B\}^T \{D^*\} \{B\} \{U\} + 2\{N\} \{U\} \{N\} \rho_0 \frac{\partial \{U_1\}}{\partial \tau} \right) dV + \\ &+ \int_S \left(\frac{1}{2} \rho_0 \beta (\{U\}^T \{N\}^T \{N\} \{U\} - 2U_p \{N\} \{U\} + U_p^2) \right) dS; \quad (10) \\ \Omega_2(U) &= \frac{1}{2} \int_V \left(\{T\}^T \{B\}^T \{H\} \{B\} \{T\} + 2\{N\} \{T\} \{N\} \rho_0 \frac{\partial \{U_2\}}{\partial \tau} \right) dV,\end{aligned}$$

де $\{D\}$, $\{D^*\}$, $\{H\}$ – матриці теплофізичних характеристик матеріалу; $\{N\}$ – матриця функцій форми; $\{U\}$, $\{T\}$ – вектори вологості і температури. Інтегрування у (10) здійснюється за окремими елементами розбиття області Ω дерев'яного бруса. На основі процедури мінімізації функціоналів $\Omega_1(U)$, $\Omega_2(U)$, після громіздких перетворень отримаємо рівняння

$$[C] \frac{\partial \{U\}}{\partial \tau} + [K] \{U\} + \{F\} = 0 \quad (11)$$

де $[C] = \int_V \rho_0 [N]^T [N] dV$; $[K] = \int_V [B]^T [D^*] [B] dV + \int_S \rho_0 \beta_w [N]^T [N] dS$; $\{F\} = \int_V [B]^T [H] [B] \{T\} dV - \int_S \rho_0 \beta U_p [N]^T dS$ – відповідно матриці теплофізичних властивостей матеріалу, демпфування та навантаження.

Для отримання значення функцій $\{U\}$ у кожній точці часового інтервалу скористаємось методом скінченних різниць [15]. Тоді розв'язок диференційного рівняння (11) зводиться до системи рівнянь вигляду

$$[A] \{U\}_{\text{наступне}} = \{R\} \quad (12)$$

де $[A] = 0.5[K] + [C]/\Delta\tau$; $\{R\} = ([C]/\Delta\tau - 0.5[K]) \{U\}_{\text{попереднє}} - 0.5(\{R\}_{\text{наступне}} + \{R\}_{\text{попереднє}})$.

Аналогічний підхід використано для першого рівняння математичної моделі (1) – (3) теплоперенесення. Варіаційний функціонал у цьому випадку має вигляд

$$\begin{aligned}\Omega(T) &= \frac{1}{2} \int_V \left(\lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial x_1} \right)^2 + \lambda_2 \left(\frac{\partial T}{\partial x_2} \right)^2 + 2c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} T - 2\rho_0 r \varepsilon \frac{\partial U}{\partial \tau} T \right) dV + \\ &+ \int_S \left(\frac{\alpha}{2} (T_c - T)^2 - \rho_0 r (1 - \varepsilon) \beta (U - U_p) T \right) dS.\end{aligned} \quad (13)$$

Записуючи (13) у матричній формі, після громіздких перетворень для знаходження значень температурного поля одержуємо

$$[C_T] \frac{\partial \{T\}}{\partial \tau} + [K_T] \{T\} + \{F_T\} = 0 \quad (14)$$

де $[C_T]$, $[K_T]$, $\{F_T\}$ – відповідні матриці, пов'язані з коефіцієнтами теплопровідності та теплообміну.

Застосовуючи до рівняння (14) метод скінченних різниць, отримаємо

$$[A_T] \{T\}_{\text{наступне}} = \{R_T\} \quad (15)$$

де $[A_T] = 0.5[K_T] + [C_T]/\Delta\tau$; $\{R_T\} = ([C_T]/\Delta\tau - 0.5[K_T]) \{T\}_{\text{попереднє}} - 0.5(\{R_T\}_{\text{наст.}} + \{R_T\}_{\text{попереднє}})$.

Оскільки теплофізичні коефіцієнти деревини залежать від температури і вологості, то ітераційний процес реалізації рівнянь (12) і (15) здійснюється на кожному часовому кроці. Умовою завершення ітерацій для рівнянь (12) і (15) є умови $\{U_n\} - \{U_{n-1}\} \leq 10^{-4}$ і $\{T_n\} - \{T_{n-1}\} \leq 10^{-4}$.

Чисельне розв'язання математичної моделі (4) – (9)

Після визначення температурно-вологісних полів шляхом чисельного розв'язання математичної моделі (1) – (5) перейдемо до реалізації математичної моделі визначення напружено-деформівного стану деревини у в'язкопружній області деформування з врахуванням накопичення незворотних деформацій. Для цього побудуємо варіаційне формулювання моделі (4) – (9) на основі принципу мінімуму повної потенціальної енергії [7, 13]. Функціонал Лагранжа, мінімум якого збігається з розв'язанням математичної моделі (4) – (9), має вигляд

$$\Pi(u) = \frac{1}{2} \int_V u^T B^T C B u dV + \int_{\Omega} u^T B^T C \int_0^t R(t, \tau) B u d\tau dV - \int_V u^T B^T C (\alpha \Delta T + \beta \Delta U) dV. \quad (16)$$

де B – це матриця: $B^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_2} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_2} \end{bmatrix}$.

Розв'язок задачі про мінімум функціоналу (17) методом скінченних елементів шукається на основі використання невідомих функцій $\varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_N(x)$. Тоді переміщення на кожному елементі V_e виражаються через вузлові значення переміщень:

$$u_1(\tau, x) = \sum_{e=1}^N u_{1e}(\tau) \varphi_e(x), \quad u_2(\tau, x) = \sum_{e=1}^N u_{2e}(\tau) \varphi_e(x). \quad (17)$$

Введемо розбиття по часу за правилом $s_k = \tau_k = k \Delta \tau$, $k = 0, 1, \dots, M$, $\Delta \tau = T/M$, де M – натуральне число, та позначимо $u_e^k = \{u_{1e}(\tau_k), u_{2e}(\tau_k)\}^T$. Вектор переміщень на k -му кроці за часом можна виразити

$$u(\tau_k, x) = \sum_{e=1}^N u_e^k \varphi_e(x).$$

Замінімо інтеграл по часу в функціоналі (16) формулою трапецій [13] згідно з введеним розбиттям. Підставляючи співвідношення (17) в функціонал (16) і підсумувавши по всіх скінченних елементах, із умови мінімуму функціоналу $\delta \Pi = 0$, на кожному кроці за часом, отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь ($k = 1, \dots, M$) вигляду:

$$\begin{aligned} & \sum_{e=1}^N u_e^k \left[\frac{1}{2} \int_{\Omega_e} B^T C B \varphi_e(x) d\Omega \right] + \sum_{e=1}^N u_e^k \left[\frac{\Delta \tau}{2} \int_{\Omega_e} B^T C R(s_k, \tau_k) B \varphi_e(x) d\Omega \right] = \\ & = \sum_{e=1}^N \left[\int_{\Omega_e} B^T C (\alpha \Delta T(\tau_k, x) + \beta \Delta U(\tau_k, x)) d\Omega \right] - \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{e=1}^N u_e^i \left[\Delta \tau \int_{\Omega_e} B^T C R(s_k, \tau_i) B \varphi_e(x) d\Omega \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Зазначимо, що у (18) матриці C і R характеризують пружні і в'язкопружні та механіко-сорбційні властивості деревини. У компактному вигляді (18) можна записати так:

$$[K] \{U\} = [F] - [K] \{U_0\} \quad (19)$$

де $[K] = \sum_{i=1}^N [K^i]$ – матриця жорсткості, яка визначається пружними властивостями деревини і геометричними параметрами елемента розбиття; $[F]$ – матриця навантаження, яка визначається реологічною поведінкою деревини (7) і характеристиками температурно-вологісних полів, визначених з чисельної реалізації математичної моделі (1) – (3); $\{U\} = \{u_1, u_2\}$ – вектор вузлових переміщень деревини як в'язкопружного матеріалу.

Для моделювання пружнопластичних деформацій у випадку плоского напруженого стану скористаємось результатами [14]. Тоді система алгебраїчних рівнянь матиме вигляд, аналогічний

(19). Але матриця фізичних властивостей матеріалу в загальних матрицях рівняння $[K]$ та $[F]$ міститиме пластичні властивості та отримується з співвідношень (9). Вона матиме вигляд

$$[D^{nl}] = \varphi \frac{E}{Q} \begin{bmatrix} s_{yy}^2 + 2p & -s_{xx}s_{yy} + 2vp & -\frac{s_{xx} + vs_{yy}}{1+v} s_{xy} \\ -s_{xx}s_{yy} + 2vp & s_{yy}^2 + 2p & -\frac{s_{xx} + vs_{yy}}{1+v} s_{xy} \\ -\frac{s_{xx} + vs_{yy}}{1+v} s_{xy} & -\frac{s_{xx} + vs_{yy}}{1+v} s_{xy} & \frac{R}{2(1+v)} \end{bmatrix} \quad (20)$$

де $p = s_{xy}^2 / (1 + \nu)$, $R = s_{xx}^2 + 2\nu s_{xx}s_{yy} + s_{yy}^2$; $Q = R + 2(1 - \nu^2)p$; φ – стала, для пластичного матеріалу дорівнює одиниці; s_{ij} – девіатор напружень.

Для в'язкопружної області деформування обчислювали за формулами (18), (19) з врахуванням матриць із співвідношень (6), (7). Коли інтенсивність девіатора напружень $\bar{\sigma}$ на елементі перевищує границю текучості [14, 15], тоді розрахунок локальної матриці у (19) здійснюється з використанням (20).

Програмна реалізація моделей

Для розроблення програмного забезпечення реалізації математичних моделей виділені програмні моделі, які є самостійною сутністю об'єктно-орієнтованої реалізації алгоритмів МСЕ у контексті основних питань і термінів методу. Такий підхід дає змогу розкласти програмну систему у вигляді класів та відношень між ними. Пояснення зв'язків між спроектованими класами та взаємодію об'єктів цих класів здійснено за допомогою діаграм UML. В окремі пакети виділено класи, які реалізують: геометричні та фізико-механічні характеристики об'єкта досліджень; розбиття області на скінченні елементи за допомогою сітки вузлів; визначення базисних функцій в межах скінченних елементів; обчислювальні класи (квадратури для чисельного інтегрування); інтерполяційні функції; розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР); класи орієнтовані на конкретні обчислення матричної та векторної алгебри; класи збереження введення та виведення даних; інтерфейс користувача.

Розпочинаючи побудову архітектури програмної системи мовою Java з використанням середовища IDE Eclipse Helios, необхідно визначити основні абстракції.

Точка входу в програму перебуває в класі Main, в якому знаходиться функція main(). Звідси запускається вікно для введення даних – фрейм JFrame, який успадковується від системного класу-вікна JFrame. На формі розташовані поля для введення даних, які представлені спеціально розробленим класом DoubleTextField, для введення числових даних. Клас успадкований від JTextField. Основним методом у цьому класі є getValue(), який повертає введені значення типу double. Для того, щоб компонент працював тільки з числовими значеннями перевантажено метод createDefaultModel(), який повертає об'єкт типу DoubleTextDocument.

Після завершення введення даних відбувається ініціалізація класу для їх зберігання – InputDataHolder – це синглтон, який створюється тільки один раз протягом одного сеансу використання програми і забезпечує доступ до вхідних даних в будь-якій точці. За створення цього класу відповідає метод getInstance():

```
private static InputDataHolder instance = null;
public static InputDataHolder getInstance()
{
    if(instance == null){
        synchronized (InputDataHolder.class)
        {
            if(instance == null){
                instance = new InputDataHolder();
            }
        }
    }
    return instance;
}
```

Розпочнемо декомпозицію системи з виділення абстракцій, які відповідатимуть за паралельні обчислення, це – об’єкт, який відповідатиме за триангуляцію (Triangulator), потік для обчислень значень температури (TFECalculator), потік для обчислень вологості (WFECalculator).

Окремий потік (Thread) являє собою клас для здійснення триангуляції – розбиття на трикутники – Triangulator (рис. 1). Він успадковується від системного класу Thread і реалізує інтерфейс Runnable. Відповідно до концепції багатопотоковості в Java основні операції виконуються в методі run(). Для доступу до початкових даних тут використовується клас-сінглетон InputDataHolder, в якому зберігаються вхідні дані програми. Для сповіщення інших об’єктів у програмі про закінчення процесу розбиття використовується інтерфейс OnTriangulationListener. У ньому викликається метод onTriangulationFinished() відразу після закінчення процесу.

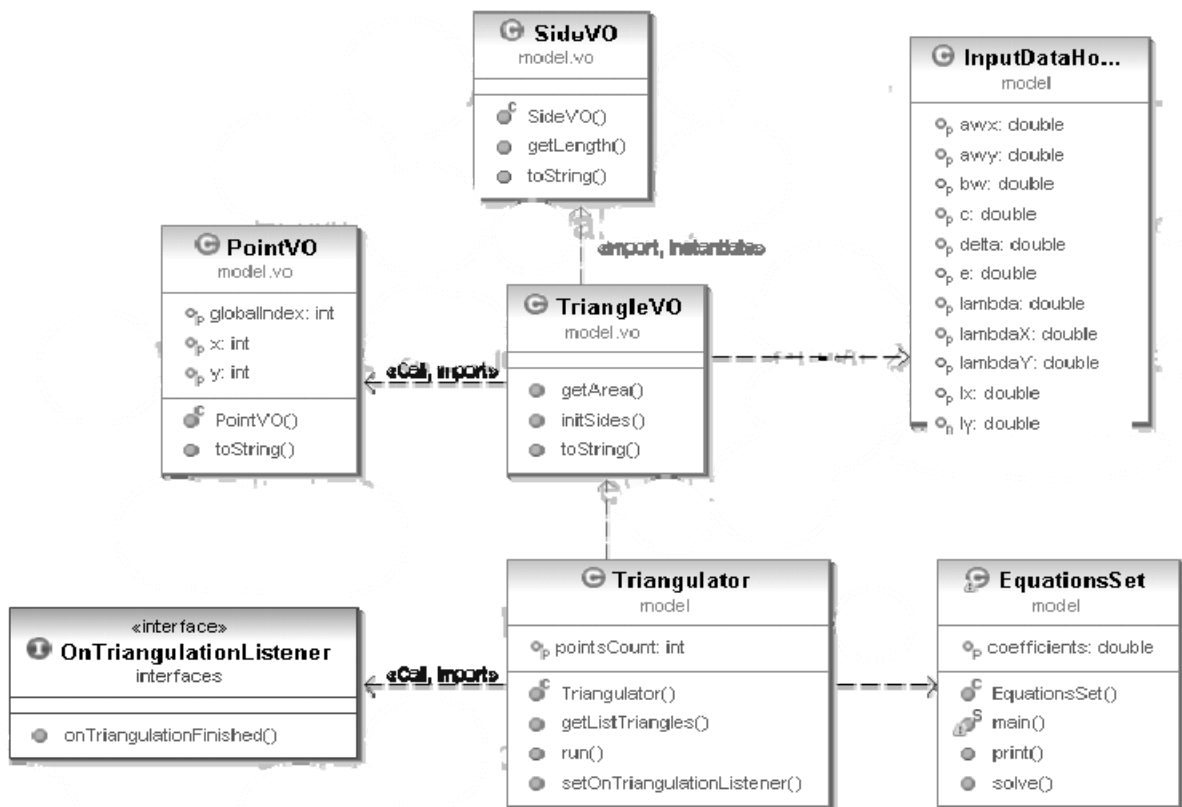


Рис. 1. Діаграма класів "Триангуляція"

Для представлення простих абстракцій, таких як трикутник, точка, сторона та інших використано поняття об’єкта-значення (value object). Найпростішим з цих об’єктів є точка – PointVO, яка має дві координати (x, y) та глобальний індекс. Об’єкт SideVO описує одну сторону трикутника і будується на основі двох точок і має метод для обчислення довжини сторони. Трикутник (TriangleVO) використовується в моделі для логічного представлення трикутника в програмі. Він, відповідно, складається з трьох точок і трьох сторін, також має метод для обчислення площі. Тут сторони обчислюються при початковій ініціалізації самого трикутника і ніде в програмі не перераховуються для збільшення швидкодії системи.

Клас EquationSet використовується для розв’язання системи рівнянь, отриманих комбінуванням результатів триангуляції і вхідних параметрів. Основним методом тут є solve(), який фактично є проксі-методом, що переадресовує запит до рекурсивної функції розв’язання системи, а потім повертає результат. Так зроблено для зручності введення рекурсії. Метод solve() звертається до методу simplify(), який спочатку спрощує систему, а потім виконує основні рекурсивні обчислення.

Обчислення температури і вологості матеріалу відбувається в двох основних класах – WFETriangulator (вологість) і TFETriangulator (температура) (рис. 2). Ці класи є потоками, які

виконуються паралельно і взаємодіють між собою після кожної ітерації. Всі операції виконуються в методі run(), який включений в інтерфейс Runnable. Як глобальні члени класу винесені матриці C , K , і F . Результуючу матрицю можна дістати, викликавши метод getResultMatrix(), який повертає масив результатів. Оскільки класи виконують велику кількість операцій з матрицями, то найпоширеніші з них доцільно було винести у клас-утиліту MatrixUtils, який і використовується під час обчислень. Вхідні дані для обчислень потоки беруть у класі InputDataHolder.

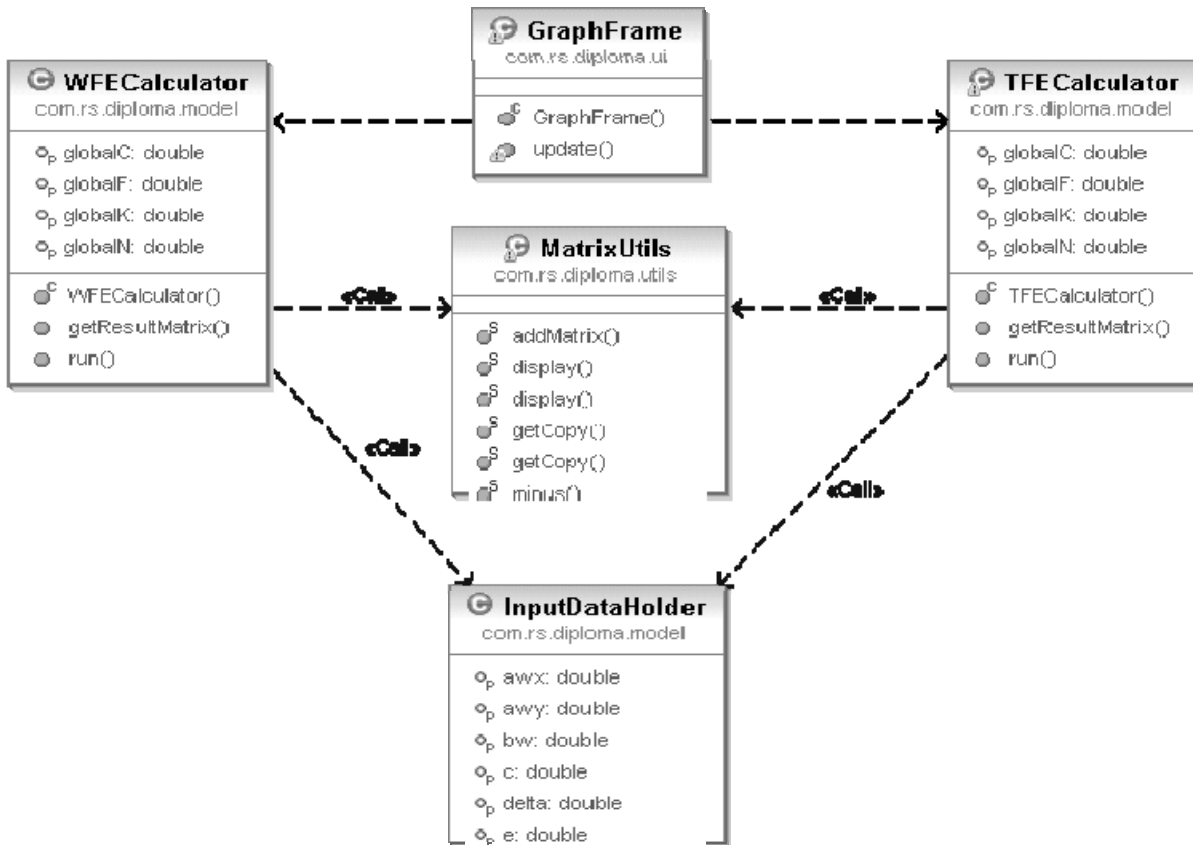


Рис. 2. Діаграма класів "Обчислення температури і вологості"

Спількування між двома потоками забезпечує механізм синхронізації в Java, заснований на методах wait, notify і notifyAll. Ці методи реалізовані, як final-методи класу Object, так що вони є в будь-якому Java-класі. Всі ці методи повинні викликатися тільки з синхронізованих методів.

Потік, який чекає виконання будь-яких умов, викликає у цього об'єкта метод wait, попередньо захопивши його монітор. На цьому його робота припиняється. Інший потік може викликати на цьому самому об'єкті метод notify (знову ж, попередньо захопивши монітор об'єкта), в результаті чого чекає на об'єкті потік "прокидається" і продовжує своє виконання.

Об'єктом для відображення результатів розрахунків слугує вікно GraphFrame, яке успадковане від системного класу JFrame (рис. 3). На його панелі можна побачити відображений зразок, розбитий на трикутники.

У програмі можна виводити графіки двох типів: тривимірні і двовимірні. Ця можливість реалізована за допомогою Java бібліотек: jzy3D і JFreeChart з відкритим кодом. Всі вікна для відображення графіків викликаються з класу GraphFrame.

JFreeChart є бібліотекою з відкритим кодом і розповсюджується за ліцензією GNU Lesser General Public Licence (LGPL), що дозволяє використовувати продукт в усіх додатках і містить такі функції: добре документований API, який підтримує велику кількість типів графіків; гнучкий дизайн, який просто впровадити; підтримка багатьох вихідних форматів, а також Swing-компоненти, графічні файли (зокрема PNG і JPEG) формати векторної графіки (зокрема PDF, EPS і SVG);

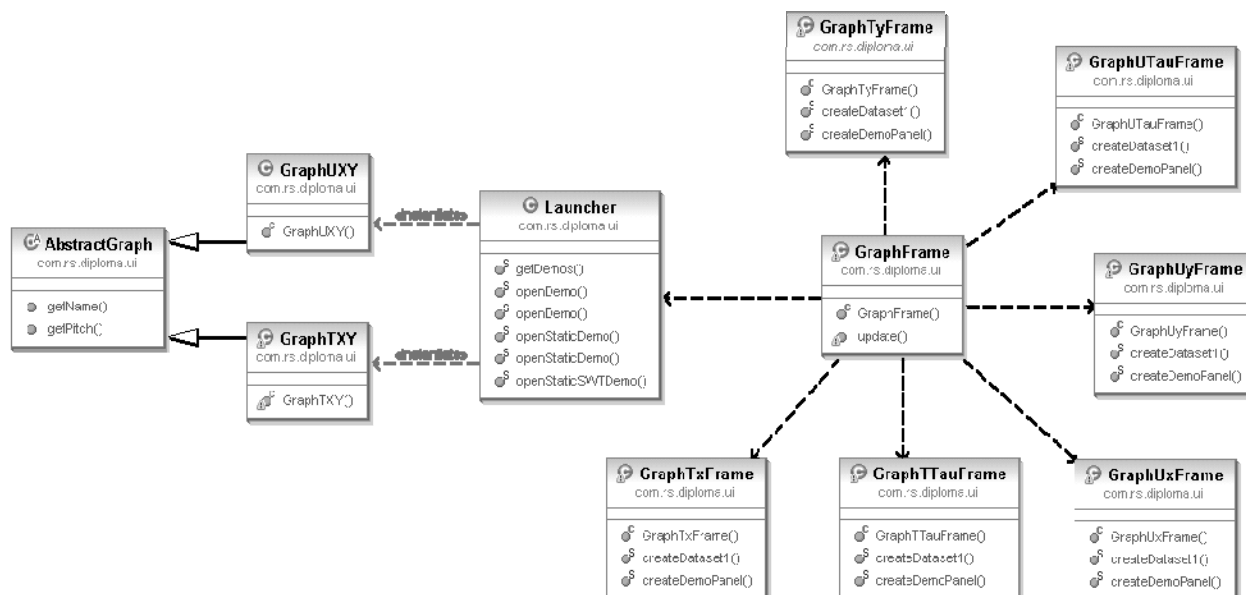


Рис. 3. Діаграма класів "Відображення графіків"

Для запуску вікон з тривимірних графіків у програмі використовується клас Launcher. Запуск нового вікна здійснюється зі статичного методу openDemo(), в який потрібно передати об'єкт, що реалізує інтерфейс IFrame. За його допомогою можна запустити вікна GraphUXY і GraphTXY, які попередньо мають бути визначені в методі getDemos():

З метою узагальнення, класи GraphUXY і GraphTXY успадковуються від класу AbstractGraph, який реалізує інтерфейс IFrame. У цих класах всі дані для побудови графіків формуються в класі getCoordinates(), який повертає список (List).

Для перевірки адекватності математичної моделі, розробленого алгоритмічного та програмного забезпечення на рис. 4 наведені порівняння досліджуваних величин – температури T і вологості U для деревини сосни (густина сухої маси $\rho_0 = 470 \text{ кг/м}^3$), визначених на основі чисельних та лабораторних експериментів. Для розрахунків вибрані сталі температурні режими (1 режим – $T_0 = 70^\circ\text{C}$, $\varphi = 50\%$, $v = 2 \text{ м/с}$ і 2 режим – $T_0 = 80^\circ\text{C}$, $\varphi = 60\%$, $v = 1 \text{ м/с}$). Геометричні розміри взірця $90 \times 50 \times 25 \text{ мм}$. Теплофізичні параметри вибирали згідно з експериментальними даними [16].

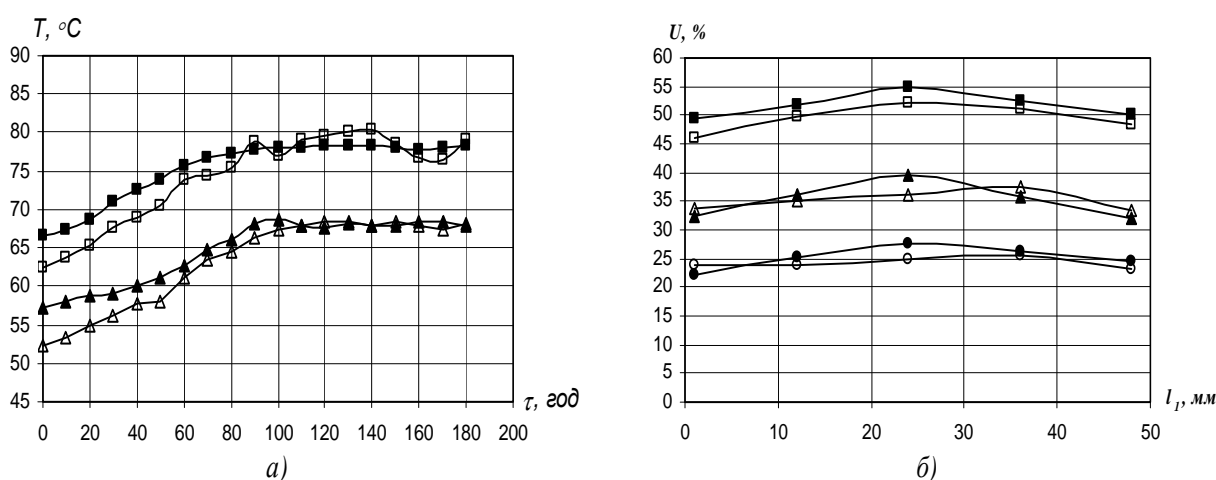


Рис. 4. Експериментальні та обчислювальні залежності: а) температури від часу (■, ▲ – експериментальні значення для режимів 1 і 2; □ і Δ – теоретичні для режимів 1 і 2), б) вологості для різних моментів тривалості сушіння (експериментальні – ■ (для $\tau=0,5\text{год}$), ▲ ($\tau=2\text{год}$), ● ($\tau=3,5\text{год}$); теоретичні – □ ($\tau=0,5\text{год}$), Δ ($\tau=2\text{год}$), ○ ($\tau=3,5\text{год}$))

Для верифікації математичної моделі наведені тестові розрахунки полів деформацій і напружень. Їх аналіз, а також аналіз графічних залежностей (рис. 4) свідчить про задовільну збіжність чисельних та експериментальних значень досліджуваних величин.

Висновки

У межах об'єктно-орієнтованого підходу розроблене програмне забезпечення для чисельного моделювання та аналізу процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів. Побудовані алгоритми методу скінченних елементів для в'язкопружної та пружно-пластичної області деформування деревини. За допомогою порівняння чисельних та експериментальних даних показано адекватність математичної моделі досліджуваним процесам.

1. Уголев Б.Н. Деформативность древесины и напряжения при сушке. – М.: Лесная промышленность, 1971. – 174 с.
2. Соколовський Я.І. Технологічні напруження і деформації деревини у процесі сушіння // Науковий вісник: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 1999. – Вип.9.3. – С. 168–176.
3. Соколовський Я.І., Поберейко Б.П. Расчет нестационарных напряжений в древесине при воздействии влаги // Лесной журнал: Изв. ВУЗов России. – 2000. – №1. – С. 99–105.
4. Соколовський Я.І. Дослідження плоского напружено-деформованого стану деревини у процесі сушіння // Науковий вісник: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 1997. – Вип.8. – С. 161–168.
5. Луцьк Р.В. Напряженно-деформируемое состояние твердого тела в процессе сушки // Теоретические основы химической технологии. – 1988. – Т.22., №1. – С. 21–28.
6. Соколовський Я.І., Дендюк М.В. Математичне моделювання двовимірного в'язкопружного стану деревини у процесі сушіння // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2008. – Вип.7. – С. 17–26.
7. Соколовський Я.І. Моделювання деформаційно-релаксаційних процесів у висушуваній деревині методом скінченних елементів / Я.І. Соколовський, А.В. Бакалець // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів: Нац. ун-т “Львівська політехніка”. – 2006. – Вип.565. С. 51–57.
8. Соколовський Я.І. Моделювання та оптимізація технологічних режимів сушіння деревини / Я.І. Соколовський, А.В. Бакалець // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів: Нац. ун-т “Львівська політехніка”. – 2008. – Вип.629. С. 105–111.
9. Sokolowskyu Ya., Mokrytska O. Mathematical simulation of deformational and relaxation process in capillary-porous materials // Forestry, forest, paper and wood working industry. – 2010. – Vol. 36. p. 116–124.
10. Соколовський Я.І., Андрашек Й.В. Методика та результати експериментальних досліджень реологічної поведінки деревини // Науковий вісник: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 1999. – Вип.9.13. – С. 15–26.
11. Salin J.-G. Calculation of moisture profiles and stresses development during drying of round wood for log-houses // Proc. 4th Int. Wood Drying Conference. – 1996, p. 181–186.
12. Можаровський М.С. Теорія пружності, пластичності і повзучості. – К.: Вища школа. – 2002. – 312 с.
13. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир. – 1979. – 378 с.
14. Yamacla Y., Yoshimura N. and Sakarai T. Plastik stress-strain matrix and its application for the solution of elastic-plastic problems by the finite element method // Jut. J. Mech. Sci. – 1978. Vol.10. – p. 345-354.
15. Тюленева Е.М. Природа упругих деформаций, возникающих в древесине в момент нагрузки и разгрузки. / Е.М. Тюленева, В.Н. Курицын // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сб. ст. – Красноярск, 2005. – том 2. – С. 232–233.
16. Declic A., Majumdar S., Vorongec K. Three dimensional model for heat and mass transfer in convective wood drying // Drying technology, Vol. 21, 2003, №1.