

Ярослав Соколовський¹, Олексій Сінкевич²¹Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет "Львівська політехніка", вул. Степана Бандери 12, Львів, Україна, E-mail: yaroslav.i.sokolovskyi@lpnu.ua, ORCID 0000-0003-4866-2575²Кафедра комп'ютерних наук, Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки 103, Львів, Україна, ORCID 0000-0001-6651-5494

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ КЛІТИНОГО АВТОМАТА ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ У КАМЕРАХ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ

Отримано: вересень 19, 2023 / Переглянуто: жовтень 3, 2023 / : Прийнято: жовтень 23, 2023

© Соколовський Я., Сінкевич О., 2023

<https://doi.org/>

Анотація. В даній роботі основний акцент приділяється створенню моделі клітинного автомата для моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів. Розглядається можливість створення клітино-автоматного поля для досліджуваної 3D моделі камери сушіння періодичної дії. Розробляються відповідні алгоритми та здійснюється їхня програмна реалізація, оскільки модель клітино-автоматного поля є однією із ключових вимог для використання методу клітинних автоматів. Ще однією ключовою вимогою є наявність адекватних правил переходів. Для їх розроблення проводиться аналіз математичних моделей процесів тепло та вологоперенесення у камерах сушіння періодичної дії. Розробляються правила переходів, які дають змогу визначити зміни температури та вологовмісту матеріалу, а також зміни основних параметрів агенту сушіння, до яких відноситься температура та відносна вологість. В роботі також проводиться моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів на основі розробленої моделі клітинного автомата, що включає клітино-автоматне поле і правила переходів. Вхідні дані для моделювання, взято з параметрів технологічних умов, які застосовуються в реальних камерах сушіння. В якості досліджуваного капілярно-пористого матеріалу вибрано сосну товщиною 45 мм. з початковим вологовмістом 65%. В результаті проведеного моделювання отримано графічні залежності шуканих параметрів матеріалу та агенту сушіння відносно часу. Верифікація отриманих результатів проводиться шляхом їх порівняння із даними, зібраними датчиками у реальній камері сушіння. Для проведення порівняння визначається відносна похибка, середні значення якої не перевищують 10%. Такий результат дозволяє підтвердити адекватність розробленої моделі клітинних автоматів.

Ключові слова: метод клітинних автоматів, правила переходів, клітино-автоматне поле, нестационарний процес тепло та масоперенесення.

Вступ

Протягом останнього десятиліття були зроблені значні зусилля для вдосконалення процесів сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема шляхом створення нових і більш ефективних конструкцій камер сушіння періодичної дії. Продовжується пошук можливостей для поліпшення ефективності та якості сушіння, що допомагає знизити споживання енергії та втрати сировини. У цьому контексті, дослідження в галузі моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів набуває великого значення. Продовжується розвиток нових методів моделювання та вдосконалення існуючих на основі сучасних наукових досліджень. Однак моделювання все ще залишається високо витратним за рахунок потреби в обчислювальних ресурсах та часі. Тому дослідники працюють над знаходженням

балансу між точністю результатів та часом, необхідним для їх отримання. При цьому, одним з потенційних рішень може бути використання методу клітинних автоматів, який набуває популярності.

Об'єктом дослідження є процес сушіння капілярно-пористих матеріалів у камерах періодичної дії.

Предметом дослідження є модель клітинного автомата для моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів у камерах періодичної дії на прикладі деревини.

Метою дослідження є розробка моделі клітинного автомата для моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів, яка включає клітино-автоматне поле та відповідні правила переходів.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні *основні завдання дослідження*:

- Розроблення алгоритмів для представлення досліджуваної 3D моделі камери сушіння періодичної дії у вигляді клітино-автоматного поля;

- Проведення аналізу математичних моделей процесів тепло та вологоперенесення у камерах сушіння періодичної дії;

- Розроблення правил переходів для моделі клітинних автоматів на основі проведеного аналізу;

- Моделювання процесів сушіння капілярно-пористих матеріалів в камері сушіння періодичної дії з використанням моделі клітинних автоматів;

- Аналіз та верифікація отриманих результатів із реальними експериментальними даними.

Наукова новизна – Розроблено та досліджено нову модель клітинного автомата для моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів. Відмінність цієї моделі від існуючих полягає в тому, що вона дає змогу визначити основні параметри матеріалу та агенту сушіння із врахуванням фізичних та геометричних характеристик досліджуваної 3D моделі камери сушіння періодичної дії. Такий підхід дає можливість застосовувати новий вигляд клітино-автоматного поля та нові правила переходів.

Практична значимість – Розроблено алгоритми створення клітино-автоматного поля та схеми взаємозв'язків між суміжними та дотичними клітинами, що дає змогу підвищити швидкість моделювання у порівнянні з методом скінчених різниць. Завдяки цьому, можна отримати оптимальні вхідні параметри для подальшого моделювання у програмах для обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics, CFD). До таких програм можна віднести SolidWorks Flow Simulation, який використовується для моделювання і аналізу течії рідини або газу в різних системах і конструкціях.

Методи дослідження – метод 3D проектування для створення 3D моделі камери сушіння періодичної дії, метод клітинних автоматів для проведення моделювання, а також метод визначення відносної похибки для порівняння результатів моделювання.

Огляд літературних джерел за темою публікації

Для розуміння сучасного стану цієї проблематики проведено аналіз робіт по моделюванню процесів сушіння капілярно-пористих матеріалів, де враховуються параметри агенту сушіння. Зокрема у роботі [1] вирішуються складні завдання, пов'язані з переносом тепла і маси під час високотемпературної обробки деревини. Для аналізу цих процесів, використовуються тривимірні рівняння Нав'є–Стокса для рідини, а також рівняння енергії та концентрації. Досліджувана модель базується на методі, розробленому Луйковим, і включає систему взаємозв'язаних рівнянь для тепло- та масопереносу. У свою чергу, у роботі [2] дослідники розробили комплексну тривимірну математичну модель тепло- та вологообміну в деревині, що піддається конвективному сушінню та враховує вплив параметрів агенту сушіння. При цьому у роботі [3] дослідники моделюють процес сушіння в турбулентному режимі із врахуванням параметрів потоку агенту сушіння. При цьому, ці потоки розглядаються в різних конфігураціях і умовах експлуатації. Математичні моделі з цих робіт можуть стати основою для розроблення правил переходів для моделі клітинного автомата для моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів в камерах сушіння.

Проаналізувавши великий обсяг літератури, вдалося знайти лише кілька робіт, де дослідники застосовують клітинні автомати при моделюванні процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема в роботі [4]. В цій роботі дослідники розробляють та використовують математичні моделі для моделювання процесу вологоперенесення в пиломатеріалах під час сушіння. Особлива увага в цій роботі

приділяється порівнянню результатів застосування методів скінченних елементів та клітинних автоматів для моделювання процесу сушіння в двовимірному випадку. В роботі зазначено, що обидва підходи продемонстрували адекватні результати, однак метод клітинних автоматів показав багатообіцяючі результати з точки зору обчислювальної ефективності та точності в певних областях. Таким чином ця робота підтверджує перспективність обраного напрямку дослідження. При цьому, у роботі [5] дослідники застосовують метод асинхронних клітинних автоматів при моделюванні задач теплопровідності. В цій роботі розглянуто типові задачі з теорії теплопровідності та проведено їх розв'язки методом клітинних автоматів. Важливим моментом цієї роботи є здійснення аналізу точності обчислень та порівняння швидкості обчислень у порівнянні з методом скінченних елементів. Варто також відзначити роботу [6], яка хоч і не зовсім відноситься до даного дослідження, однак є цікавою з точки зору реалізації процесу теплопровідності методом клітинних автоматів. Запропонований у роботі підхід дозволяє змоделювати процес теплопровідності швидко, однак з деякими обмеженнями, серед яких необхідність нехтування деякими параметрами для досягнення бажаного результату.

Результати та обговорення

3D модель камери сушіння та її представлення у вигляді клітино-автоматного поля.

Досліджувана 3D модель [7] складається з великої кількості компонентів, основними з яких є:

- корпус камери, що складається із дверей, стін та стелі;
- водяні калорифери, які відповідають за систему нагрівання агенту сушіння;
- зволожуючі форсунки, які відповідають за систему зволоження агенту сушіння;
- осьові вентилятори, які відповідають за систему циркуляції агенту сушіння;
- штабелі з капілярно-пористими матеріалами різних розмірів, наприклад пиломатеріали.

Наявність вищезгаданих компонентів дає змогу врахувати границю області дослідження (корпус камери), параметри агенту сушіння, в тому числі його температуру (система нагрівання), відносну вологість (система зволоження), швидкість руху (система циркуляції), а також параметри висушуваного матеріалу (штабелі з пиломатеріалів). На рис.1 наведено вигляд 3D моделі, спроектованої в SolidWorks.

Для розроблення моделі клітинних автоматів необхідне клітино-автоматне поле [8], що складається з клітин однакових розмірів. Процес створення цього поля передбачає послідовне використання трьох алгоритмів.

Перший алгоритм дозволяє провести необхідні розрахунки для визначення бажаних параметрів розбиття. Цей алгоритм є найважливішим, і вкрай необхідний для виконання двох інших. Оскільки основою для розбиття служать штабелі, тоді необхідно виконати наступні кроки:

- вказати тип розмірів пиломатеріалів. Від нього буде залежати значення базових розмірів пиломатеріалів, тобто висота, ширина та довжина;
- вказати розміри одного пиломатеріалу та їхню кількість в одному штабелі. В залежності від вказаних розмірів буде автоматично вибрано висоту прокладок між рядами пиломатеріалів;
- вказати кількість штабелів. При цьому їхнє розташування буде визначено автоматично;
- знайти найменший спільний дільник (параметр d_m) за допомогою алгоритму Евкліда відносно заданих вище розмірів пиломатеріалів та автоматично вибраного розміру прокладок між рядами;
- знайти бажану щільність розбиття (параметр d), вказавши рівень розбиття (параметр d_i);

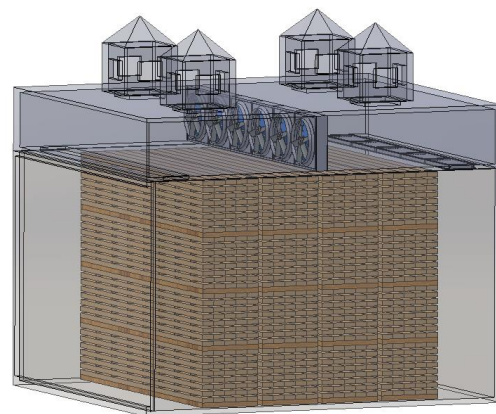


Рис. 1. Вигляд досліджуваної 3D моделі камери сушіння періодичної дії, яка була спроектована у середовищі SolidWorks

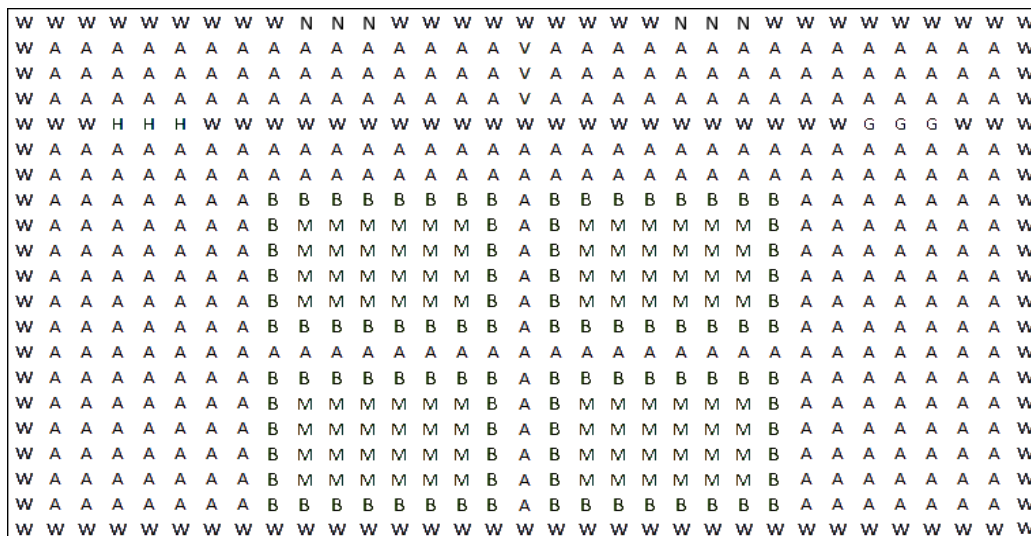


Рис. 3. 2D вигляд клітино-автоматного поля для досліджуваної 3D моделі камери сушіння

Аналіз математичної моделі тепло і масоперенесення в лісосушильній камері.

Для створення правил переходів необхідно провести аналіз математичних моделей тепло- та масоперенесення при сушінні капілярно-пористих матеріалів [9-14]. Оскільки досліджується ціла 3D модель камери сушіння періодичної дії, то доцільно врахувати вплив її основних компонентів на зміни основних параметрів висушуваного матеріалу та його агенту сушіння. Зокрема варто врахувати вплив температури калорифера та стін камери на температуру агенту сушіння, а також вплив зволожуючих форсунок на вміст відносної вологості агенту сушіння. Окрім цього, варто провести розрахунки початкової швидкості руху агенту сушіння, враховуючи параметри осьових вентиляторів та їх кількість.

Під час моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів важливо враховувати теплообмін між різними компонентами системи. У даному випадку, джерелом тепла є водяні калорифери, а об'єктом нагріву є пиломатеріали. Передача тепла відбувається через агент сушіння. Однак це ідеальний теплообмін, який в реальному житті не можливо реалізувати, оскільки частина тепла втрачається, наприклад через стіни, перекриття або дах. У зв'язку з цим, пропонується розглядати усі компоненти, які здатні поглинати тепло, як одне ціле. При цьому, параметр T_w , буде відображати загальну температуру цих компонентів. Такий теплообмін можна вважати зовнішнім, а його математична модель [15] враховує рівняння теплового балансу для потужності агенту сушіння, нагрівачів та компонентів:

$$C_h N_h m_h \frac{\partial T_h(x, y, Fo)}{\partial Fo} + N_g G_p I_p + L_{in} (C_n + C_p \varphi_n) T_n - G_0 \frac{\partial U_m(x, y, Fo)}{\partial Fo} - \frac{Nu_q \lambda_a}{rl} (T_a(x, y, Fo) - T_m(x, y, Fo)) - C_w m_w \frac{\partial T_w(x, y, Fo)}{\partial Fo} - L_{out} (C_n + C_p \varphi_a(x, y, Fo)) \cdot \quad (1)$$

$$\cdot T_a(x, y, Fo) = \left(\frac{V_a \cdot 0.622 P_{bar}(x, y, Fo) (1 + \varphi_a(x, y, Fo)) C_a}{R(273 + T_a(x, y, Fo)) (0.622 + \varphi_a(x, y, Fo))} + m_w C_w \right) \frac{\partial T_a(x, y, Fo)}{\partial Fo};$$

$$C_1 \alpha_t S_t (T_t - T_h(x, y, Fo)) - C_2 \alpha_h S_h (T_h(x, y, Fo) - T_a(x, y, Fo)) = C_h m_h \frac{\partial T_h(x, y, Fo)}{\partial Fo}; \quad (2)$$

$$\alpha_w (T_a(x, y, Fo) - T_w(x, y, Fo)) - \alpha_s (T_w(x, y, Fo) - T_n) = C_w \rho_w l_w \frac{\partial T_w(x, y, Fo)}{\partial Fo}; \quad (3)$$

$$Nu_q = 0.0641 Re^{0.8} Gu^2 Pr^{0.3333}, \quad (4)$$

де: C_h це питома теплоємність металу калорифера, Дж/(кг·К); N_h це кількість калориферів; m_h це маса одного калорифера, кг; T_h це температура поверхні калорифера, К; Fo це число Фур'є; N_g це кількість зволожуючих форсунок; G_p це кількість водяної пари, що надходить в систему через зволожуючу форсунку, кг/с; I_p це ентальпія 1 кг водяної пари, Дж/кг; L_{in} це кількість свіжого повітря, що надходить через

припливно-витяжні канали, кг/с; C_n це питома ізобарна теплоємність вхідного свіжого повітря, Дж/(кг·К); C_p це питома ізобарна теплоємність водяної пари, Дж/(кг·К); ϕ_n це відносна вологість свіжого повітря, кг/кг; T_n це температура свіжого повітря, К; G_o це маса абсолютно сухого капілярно-пористого матеріалу (деревини), кг; U_m це вологовміст капілярно-пористого матеріалу (деревини), кг/кг; Nu_q це теплообмінний критерій Нусельта; λ_a - це коефіцієнт теплопровідності повітря Вт/(м·К); r - це питома теплота пароутворення Дж/кг; l це розмір капілярно-пористого матеріалу (деревини) вздовж руху агенту сушіння, м; T_a це температура агенту сушіння, К; T_m це температура капілярно-пористого матеріалу (деревини), К; C_w це середня питома теплоємність матеріалів всіх компонентів камери сушіння, які поглинають тепло від агенту сушіння, крім капілярно-пористого матеріалу (деревини) Дж/(кг·К); m_w це маса всіх компонентів камери сушіння деревини, які поглинають тепло від агенту сушіння, крім капілярно-пористого матеріалу (деревини), кг; T_w це температура на поверхні цих компонентів, К; L_{out} це кількість зволоженого повітря, що виходить із камери через припливно-витяжні канали, кг/с; ϕ_a це відносна вологість агенту сушіння, кг/кг; V_a це об'єм агенту сушіння, м³; P_{bar} це барометричний тиск, Па; C_a це питома ізобарна теплоємність агенту сушіння, Дж/(кг·К); R це універсальна газова стала, Дж/(моль·К); m_w це маса всіх компонентів камери сушіння деревини, які поглинають тепло від агенту сушіння, крім капілярно-пористого матеріалу (деревини), кг; C_l це коефіцієнт теплових втрат калорифера в межах [0,1]; α_t - це коефіцієнт тепловіддачі від водяної пари, що конденсується, до внутрішньої поверхні калорифера, Вт/(м²·К); S_t це площа поверхні теплообміну капілярно-пористого матеріалу (деревини), м²; T_t це температура теплоносія (гарячої води) в калориферах, К; C_2 це коефіцієнт стану тепловіддавальної поверхні калорифера в межах [0,1]; α_h - це коефіцієнт тепловіддачі циліндричної поверхні калорифера Вт/(м²·К); S_h - це площа нагрівальної поверхні калорифера, м²; α_w - це коефіцієнт тепловіддачі агенту сушіння із компонентами камери сушіння, які поглинають тепло від нього, крім капілярно-пористого матеріалу (деревини), Вт/(м²·К); α_s - це коефіцієнт теплопередачі від зовнішньої поверхні стін до зовнішнього середовища, Вт/(м²·К); ρ_w це середня густина матеріалів стін з урахуванням шарів теплоізоляції, кг/м³; l_w це розмір стіни вздовж руху агенту сушіння, м; Re це критерій Рейнольдса; Gu це критерій Гухмана; Pr це критерій Прандтля.

Оскільки температура агенту сушіння змінюється разом із його відносною вологістю, необхідно також врахувати рівняння балансу вологи в камері сушіння [14,15], яке має наступний вигляд:

$$N_g G_p + L_{in} \phi_n - \frac{Nu_m \lambda_a}{rl} (T_a(x, y, Fo) - T_m(x, y, Fo)) - L_{out} \beta_a \phi_a(x, y, Fo) = \quad (5)$$

$$= \frac{V_a \cdot 0.622 P_{bar}(x, y, Fo)}{R(273 + T_a(x, y, Fo))(\phi_a(x, y, Fo))^2 + 1.622 \phi_a(x, y, Fo) + 0.622} \cdot \frac{\partial \phi_a(x, y, Fo)}{\partial Fo};$$

$$Nu_m = 0.027 Re^{0.9} Gu^{0.175} Pr^{0.3333}, \quad (6)$$

Де: Nu_m це масообмінний критерій Нусельта, визначений за А.В. Нестеренко [16], який відображає інтенсивність випаровування води з поверхні капілярно-пористого матеріалу (деревини); β_a це коефіцієнт вологообміну, м²/с.

Загалом, під час сушіння капілярно-пористого матеріалу, відповідно до закону збереження енергії, кількість теплоти, що надходить до неї, дорівнює кількості теплоти, яка була витрачена на її нагрівання та випаровування з неї вологи [16]. Такий процес теплопередачі можна назвати внутрішнім. Він враховує рівняння теплового балансу всередині капілярно-пористого матеріалу (деревини) та має наступний вигляд:

$$\frac{\partial T_m(y, y, Fo)}{\partial Fo} = (1 + \varepsilon Ko Pn Lu) \left(\frac{\partial^2 T_m(x, y, Fo)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_m(x, y, Fo)}{\partial y^2} \right) -$$

$$- \varepsilon Ko Lu \left(\frac{\partial^2 U_m(x, y, Fo)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_m(x, y, Fo)}{\partial y^2} \right). \quad (7)$$

При цьому, вологовміст капілярно-пористого матеріалу (деревини) визначається таким чином:

$$\frac{\partial U_m(x, y, Fo)}{\partial Fo} = Lu \left(\frac{\partial^2 U_m(x, y, Fo)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_m(x, y, Fo)}{\partial y^2} \right) - LuPn \left(\frac{\partial^2 T(x, y, Fo)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, Fo)}{\partial y^2} \right), \quad (8)$$

де ε це коефіцієнт фазового переходу; K_o - це критерій Косовича, який відображає залежність між кількістю теплоти, яка була витрачена на випаровування рідини з капілярно-пористого матеріалу ($r\Delta U_m$) та витраченої на його нагрівання ($C\Delta T_m$); Pn це критерій Поснова, який відображає відношення інтенсивності термодифузійного переносу вологи ($\delta\Delta T_m$) до дифузійного переносу вологи (ΔU_m); Lu це критерій Ликова, який відображає відношення коефіцієнта конвективної дифузії (a_m) до коефіцієнту дифузії тепла (a_q).

Таким чином, рівняння (1)-(8) можна вважати вихідною математичною моделлю процесу тепло- та масоперенесення в камері сушіння. Дана модель дозволяє визначити температуру і відносну вологість агенту сушіння а також температуру та вологовміст капілярно-пористого матеріалу у штабелях. Для запису граничних умов цієї математичної моделі необхідно визначити координати всіх її границь (рис. 4).

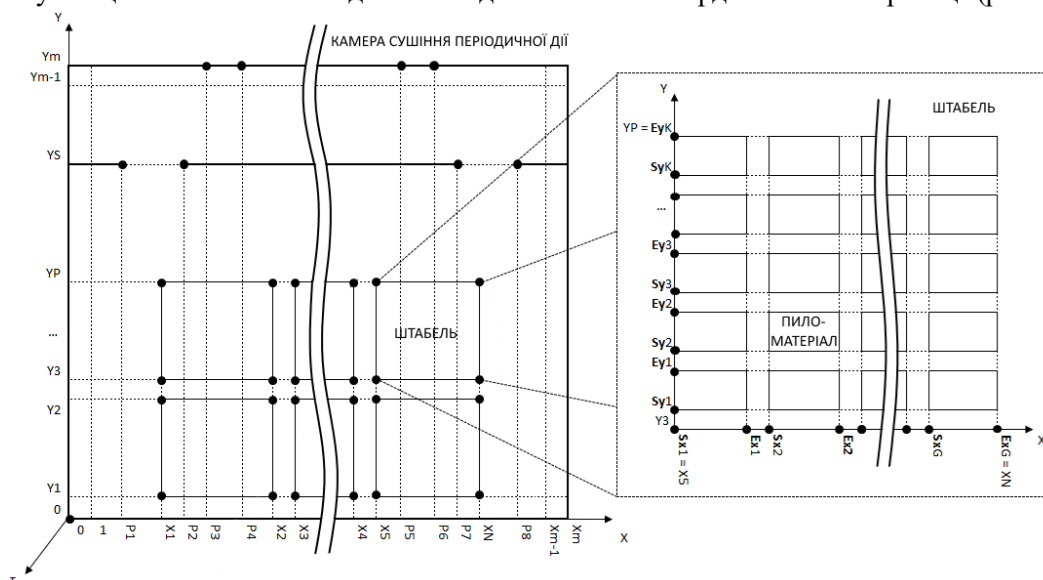


Рис. 4. Схема розташування координат граничних умов математичної моделі

Ця схема відображає загальні межі 3D моделі камери сушіння, де координата X знаходиться в межах від [0] до $[X_m]$, а координата Y в межах від [0] до $[Y_m]$. Точка $[Y_s]$ відповідає за розташування перекриття згідно координати Y. На цій схемі також відображено місця розташування бокових проходів у яких розташовані водяні калорифери (зліва) та зволожуючі форсунки (справа). Ці проходи завжди мають фіксовані значення, і по координаті Y приймають значення $[Y_s]$ а по координаті X знаходяться в межах $[P_1; P_2]$ та $[P_7; P_8]$ відповідно. При цьому, місце розташування припливно-витяжних каналів по координаті Y приймає значення $[Y_m]$ а по координаті X знаходиться в межах $[P_3; P_4]$ та $[P_5; P_6]$ відповідно.

Також важливо вказати координати розташування штабелів. Оскільки кількість штабелів у камері сушіння може змінюватись, точні координати точок $[X_n]$ і $[Y_p]$ можна визначити лише тоді, коли ця кількість буде відома. Тим не менш, початкові координати розташування штабеля завжди починаються з точки $[X_1]$. При цьому, кінцева точка координати X в кінці штабелю постійно буде на крок $[+1]$ більше від початкової точки, наприклад $[X_2]$. Таким чином, ширина одного штабелю буде еквівалентна довжині інтервалу $[X_1; X_2]$. Подібний принцип застосовується до координати Y. Наприклад, висота одного штабелю постійно дорівнюватиме відстані між точками $[Y_1]$ і $[Y_2]$, а відстань між штабелями буде еквівалентна відстані між точками $[X_2]$ до $[X_3]$.

Подібним чином можна визначити координати точок розташування капілярно-пористих матеріалів у штабелі. При цьому, координата початку розташування матеріалу завжди починається з літери "S", а

завершення з літери "E". Друга буква відповідає вибраній координаті. В результаті один матеріал має ширину еквівалентну інтервалу $[S_{x1}; E_{x1}]$ та висоту еквіваленту інтервалу $[S_{y1}; E_{y1}]$. Крім того, відстань від точки $[E_{y1}]$ до $[S_{y2}]$, буде еквівалентна висоті однієї прокладки між рядами капілярно-пористих матеріалів.

Таким чином, для описаної вище математичної моделі пропонується застосувати такі початкові умови, що характеризують початок процесу сушіння ($\tau = 0$):

$$\begin{aligned} T_m(x, y, 0) = 20^\circ\text{C}; \quad T_a(x, y, 0) = 30^\circ\text{C}; \quad T_w(x, y, 0) = 18^\circ\text{C}; \quad T_h(x, y, 0) = 70^\circ\text{C}; \\ U_m(x, y, 0) = 0.4\text{кг} / \text{кг}; \quad \varphi_a(x, y, 0) = 0.6\text{кг} / \text{кг}; \quad \varphi_n = \text{const} = 0.6\text{кг} / \text{кг}; \\ T_i = \text{const} = 80^\circ\text{C}; \quad T_n = \text{const} = 10^\circ\text{C}; \quad \rho_s(x, y, 0) = 0.0173\text{кг} / \text{м}^3. \end{aligned}$$

Через високу складність та об'єм досліджуваної 3D моделі камери сушіння, пропонується поділити її граничні умови на три зони, а саме:

- Зона сушіння, яка безпосередньо стосується капілярно-пористих матеріалів;
- Зона розташування штабелів, де передбачається контакт матеріалу з агентом сушіння;
- Зона камери сушіння, яка передбачає взаємозв'язок агенту сушіння з рештою її компонентів.

У першій зоні можна застосувати граничні умови 3-го роду, для визначення температури та вологовмісту на поверхні одного матеріалу [12, 15, 16]. Ці граничні умови мають такий вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial T_m(x_{b1}, y_{b1}, Fo)}{\partial x} &= (1 - \varepsilon)LuKoKi_m(Fo) - Ki_q(Fo), \\ \frac{\partial T_m(x_{b2}, y_{b2}, Fo)}{\partial y} &= (1 - \varepsilon)LuKoKi_m(Fo) - Ki_q(Fo), \\ \frac{\partial U_m(x_{b3}, y_{b3}, Fo)}{\partial x} &= Pn \frac{\partial T_m(x_{b3}, y_{b3}, Fo)}{\partial x} + Ki_m(Fo), \\ \frac{\partial U_m(x_{b4}, y_{b4}, Fo)}{\partial y} &= Pn \frac{\partial T_m(x_{b4}, y_{b4}, Fo)}{\partial y} + Ki_m(Fo), \end{aligned} \right. \quad (9)$$

де: Ki_q це теплообмінний критерій Кирпичова, який відображає залежність між тепловим потоком на довжину ($q(\tau)l$) до теплопровідності на різницю кінцевої та початкової температур ($\lambda\Delta T_m$); Ki_m це масообмінний критерій Кирпичова, який відображає залежність потоку рідини на довжину ($j(\tau)l$) до густини на коефіцієнт дифузії і на різницю кінцевого та початкового вологовмісту ($\rho D\Delta U_m$). При цьому, координати границь цієї зони повинні знаходитися в наступних межах:

$$\begin{aligned} &((x_{b1} \in [S_x, E_x], y_{b1} = E_y, y_{c1} = E_{y+1}) \cup (x_{b1} \in [S_x, E_x], y_{b1} = S_y, y_{c1} = S_{y-1})) \cap \\ &\cap ((x_{b2} = S_x, y_{b2} \in [S_y, E_y], x_{c2} = S_{x-1}) \cup (x_{b2} = E_x, y_{b2} \in [S_y, E_y], x_{c2} = E_{x+1})) \cap \\ &\cap (x_{b3} \in [S_x, E_x], y_{b3} = S_y \cup E_y) \cap (x_{b4} = S_x \cup E_x, y_{b4} \in [S_y, E_y]). \end{aligned}$$

У другій зоні також можна застосувати граничні умови 3-го роду, для визначення температури і відносної вологості агенту сушіння [13-15], який безпосередньо контактує з поверхнею капілярно-пористого матеріалу у штабелях. Ці граничні умови мають такий вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial T_a(x_{b5}, y_{b5}, Fo)}{\partial x} &= \frac{\alpha_{m(x)}(T_m(x_{b5}, y_{c5}, Fo) - T_a(x_{b5}, y_{b5}, Fo))}{Rv\rho_a C_a}, \\ \frac{\partial T_a(x_{b6}, y_{b6}, Fo)}{\partial y} &= \frac{\alpha_{m(y)}(T_m(x_{c6}, y_{b6}, Fo) - T_a(x_{b6}, y_{b6}, Fo))}{Rv\rho_a C_a}, \\ \frac{\partial \varphi_a(x_{b7}, y_{b7}, Fo)}{\partial x} &= \frac{a_{m(x)}\rho_0(U_m(x_{b7}, y_{c7}, Fo) - U_p)}{Rv\rho_s(x_{b7}, y_{b7}, Fo)} - \frac{\partial \rho_s(x_{b7}, y_{b7}, Fo)}{\partial x} \frac{\varphi_a(x_{b7}, y_{b7}, Fo)}{\rho_s(x_{b7}, y_{b7}, Fo)}, \\ \frac{\partial \varphi_a(x_{b8}, y_{b8}, Fo)}{\partial y} &= \frac{a_{m(y)}\rho_0(U_m(x_{c8}, y_{b8}, Fo) - U_p)}{Rv\rho_s(x_{b8}, y_{b8}, Fo)} - \frac{\partial \rho_s(x_{b8}, y_{b8}, Fo)}{\partial y} \frac{\varphi_a(x_{b8}, y_{b8}, Fo)}{\rho_s(x_{b8}, y_{b8}, Fo)}, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Розроблення моделі клітинного автомата для моделювання процесу сушіння ...

Де: $\alpha_{m(x)}$, $\alpha_{m(y)}$ це коефіцієнти теплообміну, Вт/(м²·К); v це швидкість руху агенту сушіння, м/с; ρ_a це густина агенту сушіння, кг/м³; $a_{m(x)}$, $a_{m(y)}$ це коефіцієнти вологопровідності матеріалів, м²/с; ρ_0 це базисна густина матеріалів, кг/м³; U_p це значення рівноважної вологості, кг/кг; ρ_s це густина насиченої пари, кг/м³. При цьому, координати границь цієї зони повинні бути в наступних межах:

$$\begin{aligned} & ((x_{b5} \in [S_x, E_x], y_{b5} = E_{y+1}, y_{c5} = E_y) \cup (x_{b5} \in [S_x, E_x], y_{b5} = S_{y-1}, y_{c5} = S_y)) \cap \\ & \cap ((x_{b6} = S_{x-1}, y_{b6} \in [S_y, E_y], x_{c6} = S_x) \cup (x_{b6} = E_{x+1}, y_{b6} \in [S_y, E_y], x_{c6} = E_x)) \cap \\ & \cap ((x_{b7} \in [S_x, E_x], y_{b7} = E_{y+1}, y_{c7} = E_y) \cup (x_{b7} \in [S_x, E_x], y_{b7} = S_{y-1}, y_{c7} = S_y)) \cap \\ & \cap ((x_{b8} = E_{x+1}, y_{b8} \in [S_y, E_y], x_{c8} = E_x) \cup (x_{b8} = S_{x-1}, y_{b8} \in [S_y, E_y], x_{c8} = S_x)) \end{aligned}$$

У третій зоні також можна застосувати граничні умови 3-го роду, які дають змогу визначити температуру і відносну вологість агенту сушіння на інших його межах. Наприклад, при контакті із різними компонентами 3D моделі камери сушіння, зокрема із калориферами, стінами, перекриттям, дахом чи свіжим повітрям, яке поступає із припливно-витяжних каналів. Вони мають такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_a(x_{b9}, y_{b9}, Fo) = T_n, \\ T_a(x_{b10}, y_{b10}, Fo) = T_h(x, y, Fo), \\ \varphi_a(x_{b11}, y_{b11}, Fo) = \varphi_n, \\ \frac{\partial T_a(x_{b12}, y_{b12}, Fo)}{\partial x} = -Bi_q(T_w(x_{b12}, y_{c12}, Fo) - T_a(x_{b12}, y_{b12}, Fo)), \\ \frac{\partial T_a(x_{b13}, y_{b13}, Fo)}{\partial y} = -Bi_q(T_w(x_{c13}, y_{b13}, Fo) - T_a(x_{b13}, y_{b13}, Fo)), \end{array} \right. \quad (11)$$

де: Bi_q це теплообмінний критерій Біо, який відображає відношення коефіцієнту тепловіддачі від поверхні тіла до навколишнього середовища (α_{ml}) до коефіцієнту теплопровідності матеріалу тіла (λ_m).

У цих граничних умовах зроблено ряд спрощень, зокрема вважається що температура агенту сушіння (T_a) безпосередньо біля калорифера буде рівна температурі калорифера на його поверхні (T_h), а при контакті з припливно-витяжними каналами буде рівна температурі свіжого повітря (T_n). При цьому, відносна вологість агенту сушіння (φ_a) при контакті з припливно-витяжними каналами буде рівна відносній вологості свіжого повітря (φ_n).

Координати границь цієї зони повинні знаходитися в наступних межах:

$$\begin{aligned} & (x_{b9} \in [P_3, P_4] \cup [P_5, P_6], y_{b9} = Y_{m-1}) \cap (x_{b10} \in [P_1, P_2], y_{b10} = Y_{s+1} \cup Y_{s-1}) \cap \\ & \cap (x_{b11} \in [P_3, P_4] \cup [P_5, P_6], y_{b11} = Y_{m-1}) \cap ((x_{b12} \in (0, X_1) \cup (X_2, X_3) \cup \dots \cup (X_n, X_m), \\ & y_{b12} = Y_1, y_{c12} = 0) \cup (x_{b12} \in (0, P_3) \cup (P_4, P_5) \cup (P_6, X_m), y_{b12} = Y_{m-1}, y_{c12} = Y_m)) \cap \\ & \cap ((x_{b13} = 1, y_{b13} \in (0, Y_m), x_{c13} = 0) \cup (x_{b13} = X_{m-1}, y_{b13} \in (0, Y_m), x_{c13} = X_m)) \end{aligned}$$

Окремо варто відзначити вплив кількості осьових вентиляторів та їх потужності на початкову швидкість агенту сушіння. При цьому, варто також врахувати опір штабелів, який впливає на початкову швидкість, яку загалом можна визначити наступним чином:

$$v_0 = \frac{N_v P_v (1 - e_c)}{\left(1 - \frac{h_w}{h_w - h_g}\right) l_{st} h_{st} N_{st}}, \quad (12)$$

Де: v_0 це початкова швидкість агенту сушіння, м/с; N_v це кількість осьових вентиляторів; P_v це потужність одного вентилятора, м³/с; e_c це коефіцієнт затрат під час роботи вентиляторів; h_w це висота одного капілярно-пористого матеріалу, м; h_g це висота прокладки між рядами матеріалів у штабелі, м; l_{st} це довжина одного штабелю, м; h_{st} це висота одного штабелю, м; N_{st} це загальна кількість штабелів.

Створення правил переходів на основі аналізу математичної моделі.

Провівши аналіз математичної моделі включно з її початковими та граничними умовами, можна створити правила переходів для моделі клітинного автомата [17,18]. Для відображення умовних позначень,

які використовуються в правилах переходу, можна скористатися розробленою схемою (рис.5). На ній наведено приклад взаємодії сусідніх клітин, де напрямок взаємодії W рівний координаті Y .

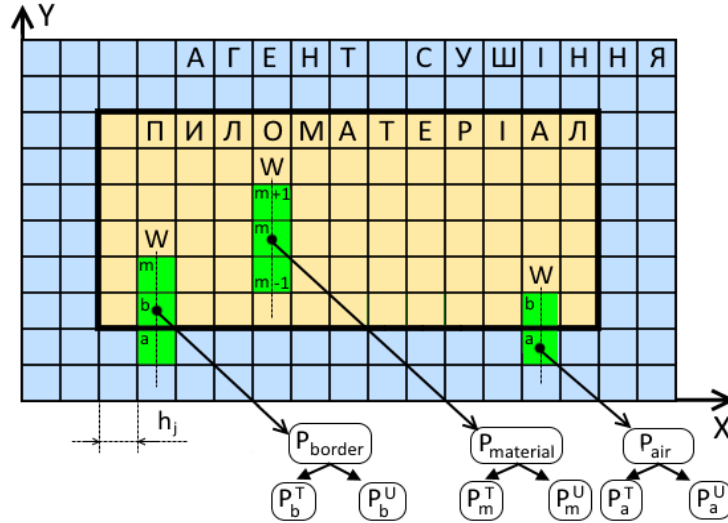


Рис. 5. Схема позначення клітин, яка застосовується при правилах переходів

Загалом використання моделі клітинного автомату передбачає виконання таких кроків:

1. Визначення напрямку взаємодії W згідно нормального закону розподілу;
2. Старт ітерації, яка рівна часовому проміжку в Δt секунд;
3. Вибір цільової клітини (mc) за рівномірним законом розподілу;
4. Перевірка типу сусідньої клітини (nc) і застосування відповідних правил переходів;
5. Повторне виконання п.2-4 допоки не буде вибрано всі клітини;
6. Завершення виконання поточної ітерації та перевірка умов завершення;
7. Завершення моделювання в разі проходження перевірки;
8. Збільшення часу моделювання і перехід до п.1 в разі не проходження перевірки.

Достатньою умовою для проходження перевірки є досягнення заданого часу моделювання або значення вологовмісту висушеного матеріалу. Основні правила переходів мають такий вигляд:

ЯКЩО $\min 'mc' = \langle M \rangle$ **І** $\min 'nc' = \langle M \rangle$ **І** $P_m^T \neq P_{m+1}^T$ **І** $P_m^U \neq P_{m+1}^U$, **ТОДІ**

$$P_{m(new)}^U = P_m^U - C_1(P_{m+1}^U - 2P_m^U + P_{m-1}^U + \delta(P_{m+1}^T - 2P_m^T + P_{m-1}^T)) \quad \text{І}$$

$$P_{m(new)}^T = P_m^T + C_2(P_{m+1}^T - 2P_m^T + P_{m-1}^T) + C_3(P_{m(new)}^U - P_m^U).$$

ЯКЩО $\min 'mc' = \langle M \rangle$ **І** $\min 'nc' = \langle B \rangle$ **І** $P_m^T \neq P_b^T$ **І** $P_m^U \neq P_b^U$, **ТОДІ**

$$P_{m(new)}^U = P_m^U - C_1(P_b^U - 2P_m^U + P_{m-1}^U + \delta(P_b^T - 2P_m^T + P_{m-1}^T)) \quad \text{І}$$

$$P_{m(new)}^T = P_m^T + C_2(P_b^T - 2P_m^T + P_{m-1}^T) + C_3(P_{m(new)}^U - P_m^U).$$

ЯКЩО $\min 'mc' = \langle B \rangle$, **ТОДІ** $P_{b(new)}^U = (C_9(P_m^T - P_b^T) + a_j P_m^U + C_{10} P_a^U) / (a_j + C_{10}) \quad \text{І}$

$$P_{b(new)}^T = (P_a^T (C_5 - C_6 - C_4 \delta) + P_m^T (C_8 - C_7) - C_1 (P_m^U - P_a^U)) / (C_5 + C_8 - C_6 - C_7 - C_4 \delta).$$

ЯКЩО $\min 'mc' = \langle A \rangle$ **І** $\min 'nc' = \langle B \rangle$, **ТОДІ** $P_{a(new)}^T = P_a^T + (C_{11} (P_b^T - P_a^T)) / C_{12} \quad \text{І}$

$$P_{a(new)}^U = P_a^U + \frac{C_{13}(P_b^U - U_p)}{C_{14}} - \frac{P_a^U(P_n - P_s)}{C_{15}P_a^T} + \frac{P_a^U P_s P_{a(new)}^T}{C_{15}(P_a^T)^2} - \frac{P_a^U P_s}{C_{15}P_a^T}.$$

ЯКЩО $\min 'mc' = \langle A \rangle$ **І** $\min 'nc' = \langle A \rangle$, **ТОДІ** $P_{a(new)}^T = \frac{(P_a^T + P_{a+1}^T)}{2}$ **І**

$$P_{a(new)}^U = \frac{(P_a^U + P_{a+1}^U)}{2}.$$

ЯКЩО $\min 'mc' = \langle A \rangle$ **І** $\min 'nc' = \langle W \rangle$ **АБО** $\min 'nc' = \langle V \rangle$, **ТОДІ** $T_w = P_a^T$.

ЯКЩО $\min 'mc' = \langle A \rangle$ **І** $\min 'nc' = \langle H \rangle$, **ТОДІ** $P_{a(new)}^T = T_h$.

ЯКЩО $\min 'mc' = \langle A \rangle$ **І** $\min 'nc' = \langle N \rangle$, **ТОДІ** $P_{a(new)}^T = T_n$.

ЯКЩО $\min 'mc' = \langle A \rangle$ **І** $\min 'nc' = \langle G \rangle$, **ТОДІ** $P_{a(new)}^U = 0.5(P_a^U + P_{a+1}^U)$.

Де значення коефіцієнтів C_1 - C_{15} можна обчислити наступним чином:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{a_j \Delta t}{h_j^2}; & C_2 &= \frac{\lambda_j \Delta t}{c_m \rho_m h_j}; & C_3 &= \frac{\varepsilon \rho_0 r}{c_m \rho_m}; & C_4 &= a_j \rho_0 (1 - \varepsilon) \beta; & C_5 &= \beta \lambda_j; \\ C_6 &= (a_j \lambda_j) / h_j; & C_7 &= \alpha_m a_j; & C_8 &= \alpha_m \beta h_j; & C_9 &= a_j \delta; & C_{10} &= \beta h_j; \\ C_{11} &= \alpha h_j; & C_{12} &= \nu c_c \rho_c h_s; & C_{13} &= a_j \rho_0 h_j; & C_{14} &= \nu \rho_s h_s; & C_{15} &= h_s \rho_s, \end{aligned} \quad (13)$$

Де: Δt це час однієї ітерації, с; h_j це розмір однієї клітини, де значення j може приймати значення x ($j=1$) або y ($j=2$); λ_j це коефіцієнт теплопровідності матеріалу у заданому напрямку, Вт/(м·К); c_m це питома теплоємність матеріалів, Дж/(кг·К); ρ_m це густина матеріалів, кг/м³; δ це термоградієнтний коефіцієнт; c_c це питома теплоємність конденсату, Дж/(кг·К); ρ_c це густина конденсату, кг/м³; h_s це відстань між капілярно-пористими матеріалами в штабелі та відстань між двома штабелями, м.

Для проведення моделювання використовується розроблене ПЗ [7], яке дозволяє здійснювати автоматизоване проектування 3D моделі камери сушіння засобами SolidWorks API. За допомогою цього ПЗ було також програмно реалізовано алгоритми створення клітинно автоматного поля, які описано вище. Окрім цього [17], передбачено можливість введення вхідних параметрів та запуск моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів за допомогою розробленої моделі клітинного автомата.

Результати та обговорення

В результаті проведеного моделювання отримано графічні залежності основних параметрів капілярно-пористого матеріалу та агенту його сушіння в часі (рис. 6). До основних параметрів можна віднести: середню температуру агенту сушіння (P_a^T), середню відносну вологість агенту сушіння (P_a^U), середню температуру висушуваних матеріалів у штабелях (P_m^T) та їх середній вологовміст у штабелях (P_m^U). Для верифікації отриманих результатів здійснено їх порівняння з реальними експериментальними даними. Ці дані отримано з використанням камери сушіння типу «LK-ZDR-100», яка розташована у ТОВ «Родорс» (Україна, Хмельницька область, м. Славута). Дані були зібрані протягом періоду з 18 по 28 березня 2023 року для капілярно-пористого матеріалу (сосна) товщиною 45 мм і з початковим вмістом вологи 65%, що цілком відповідає початковим параметрам моделювання.

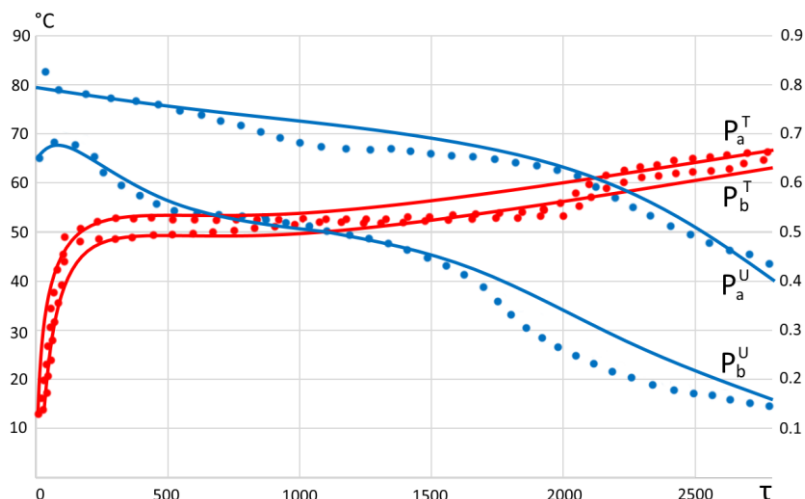


Рис. 6. Графік зміни основних параметрів $P_a^T, P_m^T, P_a^U, P_b^U$ відносно часу та експериментальних даних (*)

Порівняння результатів [19,20] здійснено шляхом визначення відносної похибки середніх значень вологовмісту на поверхні висушуваного матеріалу. Ці значення вибрано, оскільки вони мають найбільше значення при моделюванні, а їх точність є вирішальною. У результаті розрахунків, середнє значення відносної похибки (рис. 7) становить 9%. Найбільші значення цієї похибки, які становлять приблизно 17%, фіксуються у другій половині моделювання. Це може свідчити про використання невеликої кількості клітин на полі клітинних автоматів та правил переходів між ними. З плином часу це число збільшується, а точність результатів значно покращується і вже на кінець моделювання похибка не перевищує 7%.

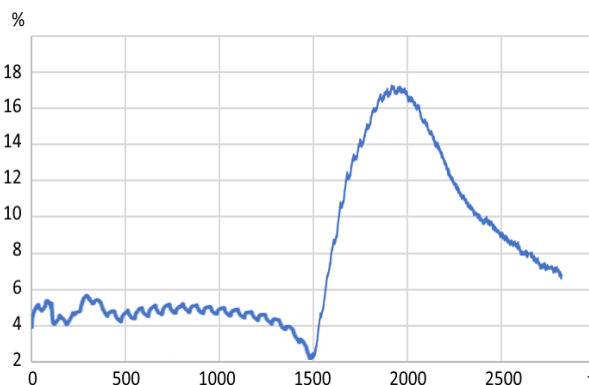


Рис. 7. Вигляд відносної похибки щодо середніх значень вологовмісту висушуваного матеріалу

Висновки

У результаті виконання даної роботи розроблено модель клітинного автомата для моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів на прикладі деревини породи сосна. Розроблена модель складається з клітино-автоматного поля та правил переходів, які враховують фізичні та геометричні характеристики досліджуваної 3D моделі камери сушіння. В роботі описано три основних алгоритми, які дають можливість представити цю 3D модель камери сушіння у вигляді клітино-автоматного поля. Для проведення моделювання, розроблено відповідні правила переходів для моделі клітинного автомата. Їх створення стало можливим завдяки проведеному аналізу математичних моделей тепло-масоперенесення в капілярно-пористих матеріалах та камерах сушіння періодичної дії. Також в роботі наведено схему співвідношень, яка відображає взаємозв'язки між сусідніми та дотичними клітинами на полі.

В результаті моделювання, отримано графічні залежності основних параметрів матеріалу та агенту його сушіння в часі. Для перевірки точності отриманих результатів проведено їх порівняння з реальними експериментальними даними, які були зібрані з використанням камери сушіння типу «LK-ZDR-100». Для їх порівняння визначено відносну похибку середніх значень вологовмісту на поверхні матеріалів у штабелях. Значення цієї похибки знаходиться в межах від 7% до 17% при середніх її показниках у 7%. При цьому, результати моделювання можна використовувати для отримання оптимальних вхідних

параметрів моделювання з можливістю їх подальшого застосування у програмах для обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics, CFD), однією з яких є SolidWorks Flow Simulation.

Перелік використаних джерел

1. Kadem, S., Lachemet, A., Younsi, R., & Kocafe, D. (2011). 3d-Transient modeling of heat and mass transfer during heat treatment of wood. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(6), 717-722. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.03.026>
2. Zhao, J., & Cai, Y. (2017). A comprehensive mathematical model of heat and moisture transfer for wood convective drying. *Holzforschung*, 71(5), 425-435. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0148>
3. Ghiaus, A. G., Istrate, M. A., & Georgescu, A. M. (2010). Air Flow Characteristics inside an Industrial Wood Pallet Drying Kiln. In *Comsol Conference, Paris*.
4. Ovsyak O.V., & Dendiuk M.V. (2023). Mathematical modeling of moisture transfer in wood drying for the two-dimensional case. *Science Bulletin of UNFU*, 33(4), 59-64. <https://doi.org/10.36930/40330408>
5. Шумиляк, Л., Жихаревич, В., & Остапов, С. (2018). Дослідження методу асинхронних клітинних автоматів при застосуванні в задачах теплопровідності. *Системи обробки інформації*, 1(152), 74-79. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.152.11>
6. Boichot, R., Luo, L., & Fan, Y. (2009). Tree-network structure generation for heat conduction by cellular automaton. *Energy Conversion and Management*, 50(2), 376-386. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.003>
7. Sokolovskyy, Y., & Sinkevych, O. (2016). Software for automatic calculation and construction of chamber drying wood and its components. In *XII International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, 209-213. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2016.7507544>
8. Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of modern physics*, 55(3), 601. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.55.601>
9. Zhao, J., & Cai, Y. (2017). A comprehensive mathematical model of heat and moisture transfer for wood convective drying. *Holzforschung*, 71(5), 425-435. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0148>
10. Zhang, J., Miao, P., Zhong, D., & Liu, L. (2014). Mathematical modeling of drying of Masson pine lumber and its asymmetrical moisture content profile. *Holzforschung*, 68(3), 313-321. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0077>
11. Ravshanov, N., Shadmanov, I., Kubyashev, K., & Khikmatullaev, S. (2021). Mathematical modeling and research of heat and moisture transfer processes in porous media. In *E3S Web of Conferences (Vol. 264, p. 01038)*. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126401038>
12. Plumb, O. A., Spolek, G. A., & Olmstead, B. A. (1985). Heat and mass transfer in wood during drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 28(9), 1669-1678. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(85\)90141-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(85)90141-3)
13. Mnasri, F., Abahri, K., El, G. M., Bennacer, R., & Gabsi, S. (2017). Numerical analysis of heat, air, and moisture transfers in a wooden building material. *Thermal Science*, 21(2), 785-795. <https://doi.org/10.2298/TSCI160421248M>
14. Sychevsky, V. A., Chorny, A. D., & Baranova, T. A. (2016). Optimization of aerodynamic conditions of the chamber drier operation. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 59(3), 260-271. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-3-260-271>
15. Hirnyk L.M., et al. (1993). Mathematical modeling of convective drying processes, *Budivelnyk*.
16. Lykov A.V. (1968). *Theory of Drying*, Energy.
17. Sokolovskyy Y., & Sinkevych O. (2021). The use of cellular automata in modeling the processes of wood drying in a stack. *Ukrainian Journal of IT*, 3(2), 39-44. <https://doi.org/10.23939/ujit2021.02.039>
18. Ilchinski, A. (2001). *Cellular automata: a discrete universe*. World Scientific Publishing Company. <https://doi.org/10.1142/4702>
19. Sokolovskyy, Y., & Sinkevych, O. (2021). Study of Heat and Mass Transfer into Biomaterials by Using Asynchronous Cellular Automata. In *16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 274-277. <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648826>
20. Sokolovskyy, Y., & Sinkevych, O. (2017). Calculation of the drying agent in drying chambers. In *14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, 27-31. <https://doi.org/10.1109/CADSM.2017.7916077>

Yaroslav Sokolovskyy¹, Oleksiy Sinkevych²

¹Computer Aided Design Systems Department, Lviv Polytechnic National University, S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, E-mail: yaroslav.i.sokolovskyy@lpnu.ua, ORCID 0000-0003-4866-2575

DEVELOPMENT OF A CELL AUTOMATA MODEL FOR SIMULATION OF THE DRYING PROCESS OF CAPILLARY-POROUS MATERIALS IN PERIODIC ACTION CHAMBERS

Received: September 19, 2023 /Revised: October 3, 2023 / : Accepted: October 23, 2023

© Sokolovsky Ya., Sinkevych O., 2023

Abstract. In this work, the main emphasis is placed on the creation of a cellular automaton model for simulating the drying process of capillary-porous materials. The possibility of creating a cell-automatic field for the studied 3D model of a periodic drying chamber is considered. Appropriate algorithms are developed and their software implementation is carried out, since the cellular automata field is one of the key requirements for using the cellular automata method. Another key requirement is the availability of adequate transition rules. For their development, the analysis of mathematical models of heat and moisture transfer processes in periodic drying chambers is carried out. Transition rules are being developed, which make it possible to determine changes in temperature and moisture content of the material, as well as changes in the main parameters of the drying agent, which include temperature and relative humidity. The paper also simulates the drying process of capillary-porous materials based on the developed cellular automaton model, which includes the cellular automaton field and transition rules. The input data for modeling are taken from the parameters of technological conditions that are used in real drying chambers. Pine with a thickness of 45 mm was chosen as the studied capillary-porous material. with an initial moisture content of 65%. As a result of the simulation, graphical dependences of the desired parameters of the material and the drying agent with respect to time were obtained. Verification of the obtained results is carried out by comparing them with data collected by sensors in a real drying chamber. For comparison, a relative error is determined, the average values of which do not exceed 10%. This result confirms the adequacy of the developed model of cellular automata.

Keywords: method of cellular automata, rules of transitions, cellular automata field, non-stationary heat and mass transfer process.