



О. В. Сінкевич¹, Я. І. Соколовський²

¹ Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

² Національний університет "Львівська Політехніка", м. Львів Україна

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ 3D-МОДЕЛІ СУШИЛЬНОЇ КАМЕРИ

Розроблено ПЗ для автоматизованого проектування 3D-моделі сушильної камери, розглянуто його функціональні можливості та графічний інтерфейс. У цьому ПЗ запропоновано використання асинхронної моделі клітинного автомата для моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів. ПЗ є результатом програмної реалізації кількох алгоритмів, зокрема: алгоритм автоматизованого проектування 3D-моделі сушильної камери за допомогою засобів SolidWorks API; алгоритм представлення досліджуваної 3D-моделі у формі клітинного автоматного поля; алгоритм розрахунку вхідних даних моделювання; алгоритм використання правил переходів для асинхронної моделі клітинних автоматів; алгоритм зберігання та виведення результатів моделювання; алгоритм порівняння результатів моделювання. ПЗ реалізовано в середовищі програмування Microsoft Visual Studio 2020 Community Version з використанням мови програмування C#. Для зберігання та управління даними застосовано реляційну систему керування базами даних за допомогою середовища MySQL Workbench 6.5. Для відображення взаємозв'язків між сутностями у БД розроблено відповідну ER діаграму. Для моделювання та візуалізації різних аспектів ПЗ створено декілька UML діаграм, зокрема класів, послідовності та використання. Роботоздатність ПЗ перевірено моделюванням процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів на прикладі сосни. Моделювання здійснено за допомогою правил переходів для моделі асинхронного клітинного автомата. Передбачено можливість порівняння отриманих результатів моделювання з експериментальними даними у спосіб їх завантаження та зіставлення. Порівняння здійснено через обчислення відносної похибки, яка не має перевищувати 10 %. Це свідчить про коректну роботу ПЗ та отримання точних і достовірних результатів. Загалом, розроблене ПЗ дає змогу використовувати клітинні автомати для моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів. Розроблене ПЗ можна застосовувати під час проектування нових та ефективніших сушильних камер, оскільки дає змогу моделювати та аналізувати отримані результати досліджень.

Ключові слова: сушіння капілярно-пористих матеріалів; SolidWorks API; ER-діаграма; MySQL Workbench; UML-діаграми; Реляційна СКБД.

Вступ / Introduction

Постановка завдання дослідження. У світі стрімкого технологічного розвитку потрібно не тільки зважати на зміни, але й активно використовувати передові інформаційні технології для вдосконалення основних галузей. Сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини, вже десятиліттями відіграє важливе значення у виготовленні високоякісних дерев'яних виробів і матеріалів. Цей процес впливає на такі галузі, як будівельна, меблева та деревообробна промисловість. Саме в цьому контексті виникає нагальна потреба в покращенні процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів. Розроблення відповідного ПЗ видається чудовою можливістю для покращення ефективності цього процесу. Таке ПЗ дасть змогу автоматизованого проектування 3D-моделей сушильних камер та використання моделі асинхронного клітинного автомата для моделювання самого процесу сушіння. Впровадження цього ПЗ у виробництво може покращити ефективність та якість сушіння капілярно-пористих матеріалів, що є важливим

завданням у сучасних умовах.

Характеристика проблеми дослідження у науковій літературі. Проблему автоматизованого проектування 3D-моделей сушильних камер та подальше моделювання процесу сушіння дослідили такі видатні науковці, як Ю. М. Губер, І. Б. Борецька, П. В. Білей, Г. С. Шубін, І. М. Крошній, Б. І. Гайвась, М. В. Дендюк та інші.

Актуальність дослідження. За результатами цього дослідження є змога проектувати 3D моделі нових сушильних камер та здійснювати моделювання процесу сушіння в них. Завдяки цьому, можна спроектувати нові й ефективніші сушильні камери, що може покращити процес сушіння. Використання розробленого ПЗ дає змогу зекономити час при проектуванні 3D-моделі нової сушильної камери та пришвидшити моделювання процесів сушіння завдяки використанню методу клітинних автоматів. Отже, це дослідження є актуальним і сприяє подальшому розвитку процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого проектування 3D- моделі сушильної камери.

Інформація про авторів:

Сінкевич Олексій Вячеславович, аспірант, кафедра комп'ютерних наук. Email: oleksiy1694@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0001-6651-5494>

Соколовський Ярослав Іванович, д-р техн. наук, професор, кафедра системи автоматизованого проектування.

Email: sokolowsky@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-4866-2575>

Цитування за ДСТУ: Сінкевич О. В., Соколовський Я. І. Автоматизоване проектування 3D-моделі сушильної камери. Науковий вісник НЛТУ України. 2023, т. 33, № 5. С. 54–62.

Citation APA: Sinkevych, O. V., & Sokolovskyy, Ya. I. (2023). Automated design of the 3D model of the drying chamber. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33(5), 54–62. <https://doi.org/10.36930/40330507>

Предмет дослідження – методи та засоби автоматизованого проектування 3D-моделі сушильної камери.

Мета роботи – розробити та реалізувати алгоритми для автоматизованого проектування 3D-моделі сушильної камери в середовищі SolidWorks засобами Microsoft Visual Studio 2020 Community Version, SolidWorks API та мови програмування C#.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі *основні завдання дослідження*:

1. Розробити схему подання 3D-моделі сушильної камери у вигляді автоматизованого проектування та алгоритм для його створення;
2. Розробити базу даних для збереження вхідних даних, а також проміжних результатів моделювання по кожній із клітин на клітино-автоматному полі;
3. Розробити ПЗ для автоматизованого проектування 3D-моделей сушильної камери та її компонент у середовищі SolidWorks засобами SolidWorks API;
4. Проведення моделювання з використанням моделі клітинних автоматів і обчислення відносної похибки для визначення достовірності отриманих результатів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для розуміння сучасного стану цієї проблематики проаналізовано сферу автоматизації проектування 3D-моделей сушильних камер та моделювання процесів сушіння у них. Зокрема, в [7] дослідники описують 3D-модель автоматизованої сушильної камери для високоякісного сушіння деревини, яка не потребує постійного втручання оператора. Акцентовано увагу на виготовленні цієї 3D-моделі сушильної камери, без застосування складного технологічного обладнання. При цьому, автоматизацію процесу сушіння досягають за допомогою циклічного режиму сушіння. У роботі [9] дослідники описують автоматизоване проектування та дослідження сушильних камер. Автоматизоване проектування 3D-моделі здійснюють засобами SolidWorks API, а моделювання за допомогою програмного додатку COSMOSFLOWWORKS, що особливий інтерес, адже цей додаток це молодша версія програмного додатку SolidWorks Flow Simulation. У роботі [14] досліджено оптимізацію алгоритмів регулювання температури під час сушіння деревини в сушильних камерах. Головною метою є розроблення апаратної платформи для створення програмних моделей та алгоритмів керування, що забезпечують якість та енергоефективність процесу сушіння. Дослідження враховує також важливість автоматизованих систем та безпеки процесу сушіння деревини. Після аналізу широкого спектра наукових досліджень виявлено тільки кілька робіт, де дослідники використовують клітинні автомати для моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини, наприклад в роботі [8]. У ній розробляють та використовують математичні моделі для симуляції процесу вологопереносу в деревині під час її сушіння. Особливу увагу приділяють порівнянню результатів застосування методів скінченних елементів і клітинних автоматів для моделювання цього процесу в двовимірному контексті. Окрім цього, у роботі [10] використовують метод асинхронних клітинних автоматів для моделювання задач теплопровідності. Важливим аспектом цієї роботи є аналіз точності обчислень методом клітинних автоматів і порівняння отриманих результатів. Варто також відзначити роботу [11], у якій основний акцент зроблено на створенні моделі клітинного автомата для моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів.

Здійснено детальний аналіз математичних моделей процесів тепло- та вологоперенесення у сушильних камерах, на основі якого розроблено правила переходів. Вони дають змогу визначити зміну температури та вологовмісту матеріалу, а також зміни основних параметрів агента сушіння, серед яких температура та відносна вологість. Правила переходів, які наведено в роботі [11], будуть програмно реалізовані у ПЗ розроблюваному.

Матеріали та методи дослідження. Для дослідження застосовано такі методи: автоматизованого проектування – для створення 3D-моделей сушильної камери; клітинних автоматів – для проведення моделювання, визначення відносної похибки – для порівняння результатів моделювання.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Автоматизоване проектування 3D-моделі сушильної камери. Будь-яка сушильна камера складається з великої кількості компонент. Проте на їх проектування потрібно багато часу та ресурсів, особливо, коли їх будуть враховуватися під час моделювання різних фізичних процесів, зокрема процесу сушіння. Отже, можна здійснити деякі спрощення, обмежившись проектуванням тільки основних компонент. До них відносять стіни, двері, перекриття, дах, штабелі з висушуваним матеріалом, калорифери, форсунки та вентилятори. Кожен з цих компонент виконує важливі функції, такі як обмеження області дослідження (двері, стіни, дах, перекриття), визначення зони дослідження (штабелі з висушуваними матеріалами), нагрівання агента сушіння (калорифери), зволоження агента сушіння (форсунки) та забезпечення циркуляції агента сушіння (вентилятори). Для більшості з цих компонент можна легко створити програмний код для їх автоматизованого проектування. Однак для таких компонент, як штабелі з матеріалами, калорифери, зволожуючі форсунки та вентилятори, цей процес складніший і містить кілька етапів автоматизованого проектування. На кожному з цих етапів створюються відповідні 2D-ескізи, на основі яких створюються їх 3D-моделі. Потім ці 3D-моделі об'єднуються в готові збірки, кількість яких може змінюватися залежно від конструкційних особливостей сушильної камери і вимог технологічного процесу.

Через складність автоматизованого проектування [12] цих компонент, вирішено створити базове креслення для кожного з них. Більшість розмірів мають сталі значення, однак деякі не мають фіксованого значення. Це дає змогу здійснювати автоматизоване проектування цих компонент із розмірами залежно від конкретних конструкторських особливостей сушильної камери.

Для автоматизованого проектування штабелів, спочатку потрібно задати геометричні розміри капілярно-пористих матеріалів. Тоді задаємо загальну кількість штабелів (від 1 до 8 шт.) та капілярно-пористих матеріалів в одному штабелі (від 4 до 40 з кроком 4 шт.). Геометричні розміри цих матеріалів можна вибрати тільки згідно з їхнім цільовим призначенням, наприклад для внутрішнього ринку, для виготовлення тари, чи для експорту. Загалом ці розміри мають однакові значення для товщини (H): 16, 19, 22, 25, 32, 40, 44, 50, 60, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250 мм та ширини (W): 75, 100, 125, 150 мм. Однак, значення довжини (L) відрізняються.

Для внутрішнього ринку ці значення знаходяться в межах від 1000 до 6500 мм з інтервалом 250. При цьому, для виготовлення тари ці значення знаходяться в межах від 500 до 6000 мм з інтервалом 100 мм. Своєю чергою, для експорту ці значення знаходяться в межах від 900 до 6300 мм з кроком 300 мм. Отже, під час здійснення автоматизованого проектування потрібно врахувати всі ці діапазони розмірів. Для цього можна скористатися головним вікном ПЗ (рис. 1), вибрати тип номінальних розмірів деревини, її породу та кількість в одному штабелі. При цьому висота прокладки між рядами у штабелі буде визначена автоматично залежно від висоти матеріалу.

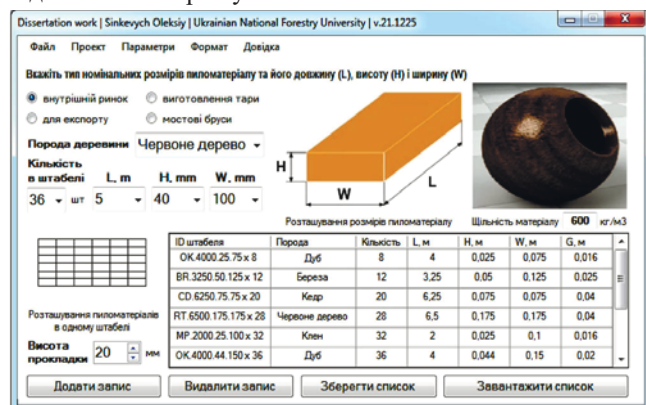


Рис. 1. Вигляд головного вікна розробленого ПЗ / View of the main window of developed software

Задавши потрібні параметри та функцію "Додати запис", в БД буде додано новий ідентифікатор штабелю. Його назва формується так: перші дві букви – це код породи деревини, наприклад "BR" – береза, "CD" – кедр, "RT" – червоне дерево, "MP" – клен, "OK" – дуб і т.д. Наступні цифри відповідають за довжину, висоту, ширину одного матеріалу та їх кількість. Вся ця інформація потрібна для автоматизованого проектування заданого штабелю.

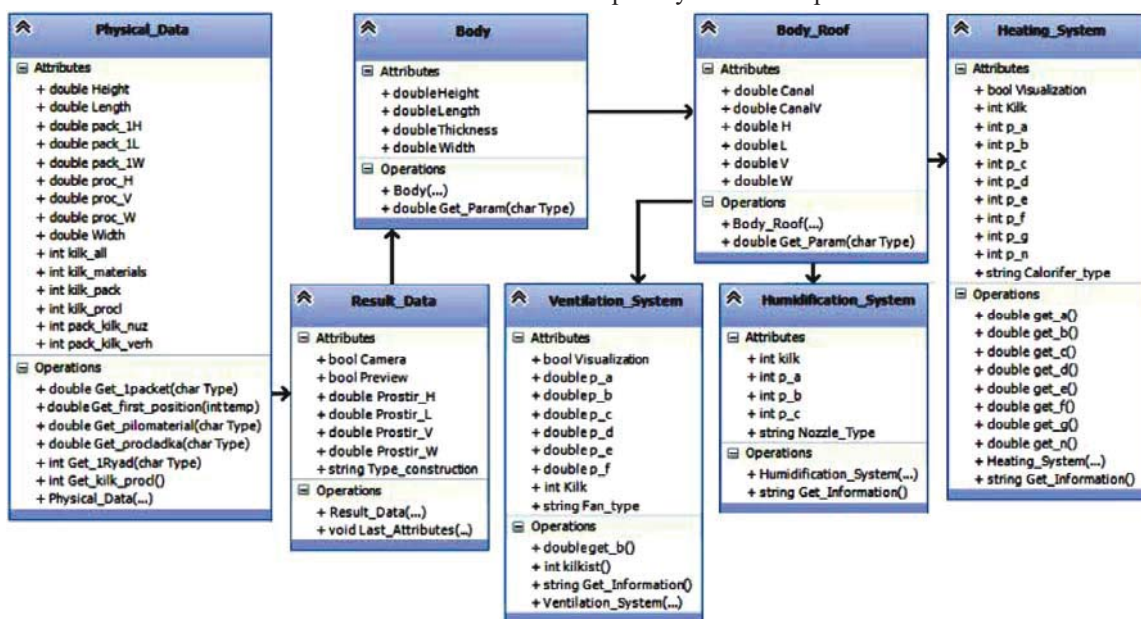


Рис. 3. Вигляд діаграми класів, які використовуються для автоматизованого проектування 3D-моделі сушильної камери / View of the class diagram used during the automated design of the 3D model of the drying chamber

Унаслідок автоматизованого проектування сушильної камери можна отримати її 3D-модель у SolidWorks (рис. 4). Для найскладніших компонент передбачено можливість здійснювати їхню параметризацію. Такий

Однак у реальних сушильних камерах завжди використовують кілька штабелів. Тому розроблено перший застосунок ПЗ (рис. 2), за допомогою якого задають кількість штабелів і вибирають їхній тип зі списку, який створюється у головному вікні програми (описано вище). Адже відомо, завантаження сушильної камери є дуже важливою операцією, багато в чому визначальною остаточну якість висушеної деревини. Ця операція повинна бути підготовлена і виконана особливо ретельно, при цьому варто приділити особливу увагу формуванню штабелів: неправильне штабелювання може привести до пошкодження дощок і до значного збільшення циклу процесу сушіння.

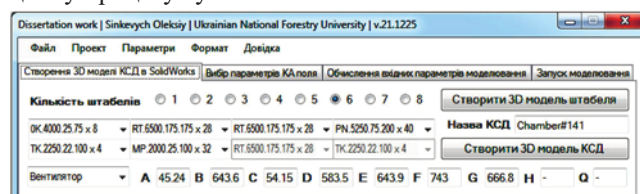


Рис. 2. Вигляд застосунку автоматизованого проектування 3D моделі камери сушіння / View of the automated design of the 3D model of the drying chamber

Також на цьому застосунку можна вказати розміри водяних калориферів і осьових вентиляторів згідно з розробленими кресленнями. Загалом, на вибір користувача, передбачена можливість автоматизованого проектування 3D-моделі штабелів або цілої збірки сушильної камери. У разі вибору цілої збірки, потрібно зазначити її назву. Окрім цього, всі спроектовані 3D моделі за замовчуванням зберігаються в каталозі програми, однак це місце завжди можна змінити в параметрах ПЗ. Для програмної реалізації автоматизованого проектування створено декілька класів (рис. 3). Клас "Physical_Data" є базовим і містить вхідну інформацію для проектування. Клас "Result_Data" зберігає проміжні дані для проектування. Решта класів містять атрибути та методи для проектування конкретних компонентів.

підхід дає змогу проектувати 3D моделі під конкретні геометричні розміри сушильної камери, що істотно зекономить час для виконання цього завдання. Адже відомо, що автоматизоване проектування виробів і техно-

логічних процесів різних виробництв, в тому числі й деревообробки, на сьогодні застосовують багато сучасних підприємств. Потрібно відзначити, що застосування автоматизованого проектування значно скорочує тривалість проектування, знижує кількість помилок, які може допустити проектувальник. Виправлення помилок при проектуванні з використанням САПР в десятки разів швидше і дешевше.

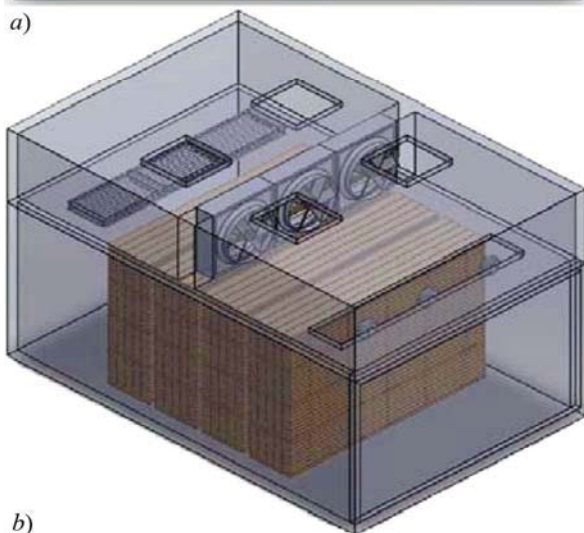
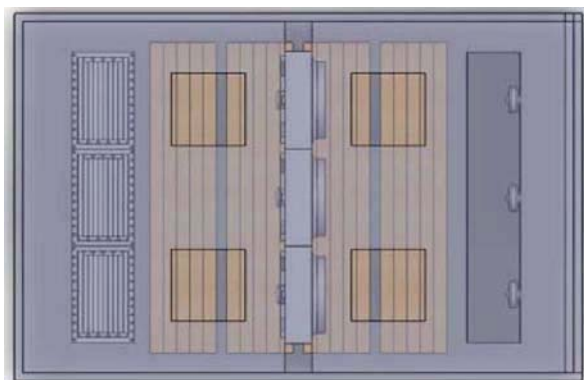


Рис. 4. Вид зверху (а) та загальний вигляд (б) спроектованої збірки сушильної камери у SolidWorks / General view (a) and top view (b) of the designed drying chamber assembly in SolidWorks

Створення клітино-автоматного поля для досліджуваної 3D-моделі сушильної камери. Для створення клітинно-автоматного поля, спочатку потрібно розробити спеціальну програму (рис. 5), яка ілюструє послідовний процес перетворення 3D-моделі штабелів. Аналогічно буде відбуватися процес перетворення 3D-моделі сушильної камери. Адже, клітинний автомат – дискретна математична модель, яка визначає сукупність клітинок, описаних певним набором, що утворюють періодичну решітку, та заданими правилами переходу, що визначають стан клітини за теперішнім станом самої клітинки та тих її сусідів, що знаходяться від неї на певній відстані, яка не перевищує максимальну.

Якщо розглядати клітино-автоматне поле в межах розташування штабелів, то клітини можуть мати різні типи, основними з яких є: "А" – це агент сушіння, "В" – це границя пиломатеріалів, а "М" – їхня внутрішня зона висушування. Для того, щоб створити клітино-автоматне поле за допомогою ПЗ, необхідно перейти на другу вкладку головного вікна програми (рис. 6). На цій вкладці також доступна можливість перегляду структури цього клітино-автоматного поля. Для цього, необхід-

но зазначити одну з координат і натиснути "Перевірити". Вигляд цього поля у двовимірному вигляді буде наведено у вікні знизу.

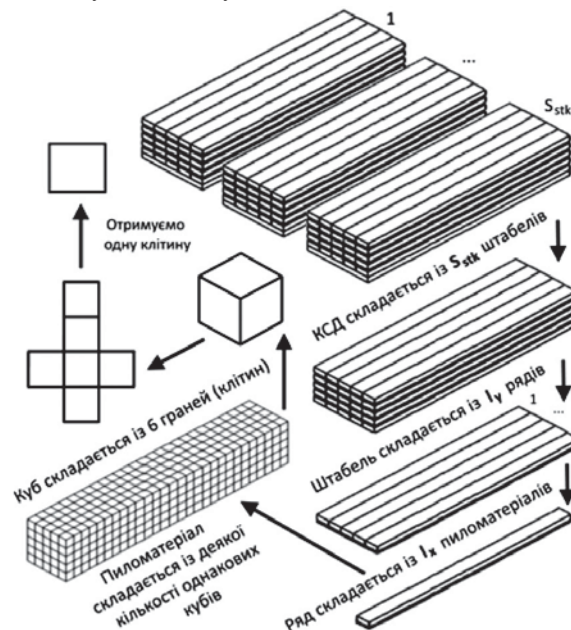


Рис. 5. Схема перетворення 3D моделі штабелів у тривимірний масив клітин / Scheme of transformation of the 3D model of stacks into a three-dimensional array of cells

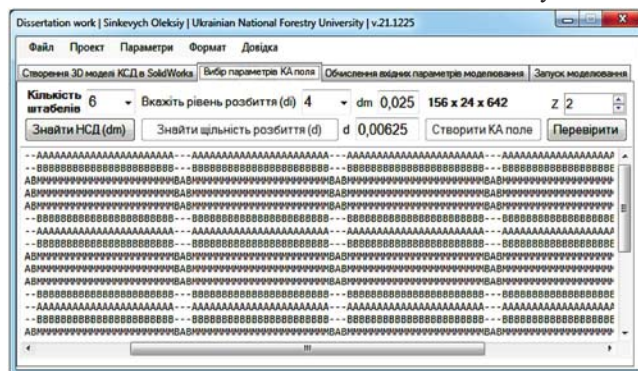


Рис. 6. Вигляд вкладки створення клітино-автоматного поля / View of the cellular automata field creation

Створення клітино-автоматного поля [2] загалом передбачає виконання таких кроків:

1. Програма зчитує розміри висушуваних матеріалів, що розташовані у штабелях, серед них "W" – ширина, "H" – висота та "L" – довжина;
2. Користувач вводить максимально допустиму щільність розбиття 3D моделі d_m , яка знаходиться через найбільший спільний дільник серед її розмірів;
3. Користувач вводить бажаний рівень розбиття d_i , який вказує на точність розрахунків. При цьому, чим вищий цей рівень, тим більше часу та ресурсів витрачається на проведення обчислень;
4. Програма визначає остаточну щільність розбиття d , яка буде дорівнювати розмірам клітин. Отже, всі клітини будуть мати однакові розміри своїх граней;
5. Програма зчитує кількість висушуваних матеріалів в одному штабелі S_{lmb} , а також визначає їх кількість в одному ряді l_x та кількість цих рядів l_y в одному штабелі. Також програма зчитує кількість штабелів S_{stk} ;
6. Програма розраховує загальну кількість клітин на клітиному автоматному полі для кожної з трьох координат S_x, S_y, S_z ;
7. Створюється тривимірний масив $[S_x][S_y][S_z]$, елементами якого є клітини.
8. Визначається тип кожної клітини на полі згідно з алгоритмом (рис. 7).

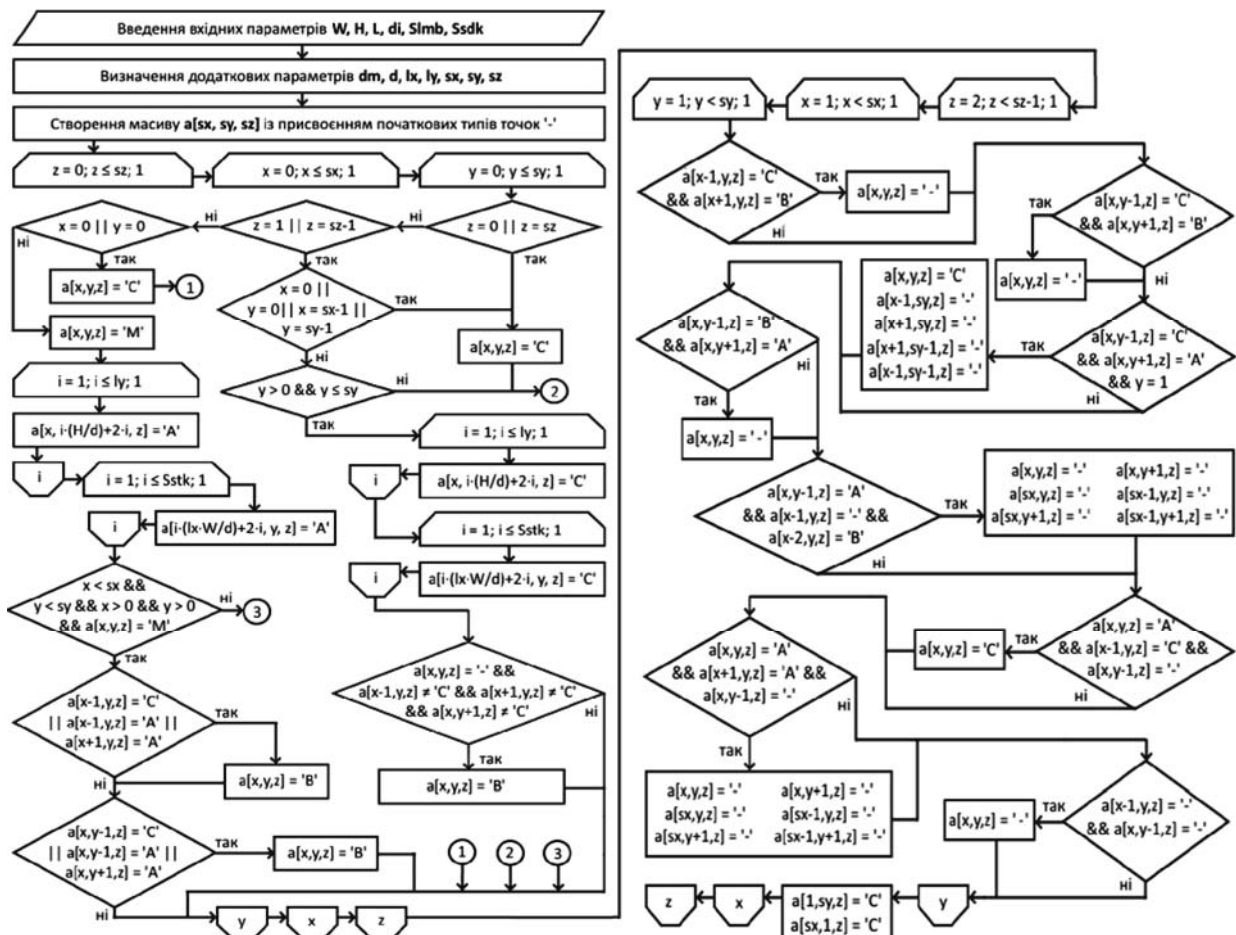


Рис. 7. Алгоритм створення клітино-автоматного поля в межах штабелів / Algorithm for creating a cell-automaton field within stacks

Розроблення БД та розмежування прав доступу.

Для введення вхідних даних моделювання потрібно перейти на третю вкладку ПЗ (рис. 8).

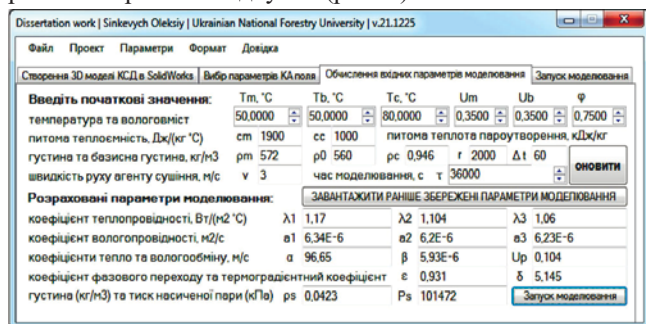


Рис. 8. Вигляд вкладки введення вхідних даних моделювання та його запуску / View of the input data of simulation and its launch

На цій вкладці користувач вводить початкові значення деяких параметрів, зокрема: температура та вологовміст пиломатеріалів; температура та відносна вологість агента сушіння; питома теплоємність; густина та базисна густина матеріалу; питома теплота пароутворення; час моделювання та крок по часу [3]. При цьому, решта параметрів, більшість мають різні коефіцієнти, буде визначено автоматично згідно з формулою. Маючи всі параметри для моделювання, можна запустити його виконання за допомогою цієї ж вкладки.

Для проведення моделювання обов'язково необхідно мати БД, в якій будуть зберігатися результати. Для її створення вирішено скористатися середовищем MySQL Workbench Community Edition. Створена БД має назву "dissertation" та складається із декількох взаємопов'язаних

них таблиць, а саме: "lumber", "stack", "chamber", "ca_field", "coefficients" та "results". Таблиця "lumber" містить унікальний код пиломатеріалу, що формується автоматично і має таку структуру: XX.LL.NH.WW, де XX – порода деревини (береза – BR, кедр – CD, Бук – RT, клен – MP, дуб – OK, сосна – PN, тик – TK), LL – довжина, NH – висота, WW – ширина пиломатеріалу в мм. Також в цій таблиці є інформація про густину матеріалу. Таблиця "stack" містить унікальний код штабеля, що формується автоматично і має таку структуру: XX × LL, де XX – кількість пиломатеріалів у штабелі, а LL – унікальний код пиломатеріалу.

Також в цій таблиці є дані про кількість пиломатеріалів у штабелі, їх розташування та інформація про розміри та кількість прокладок між рядами пиломатеріалів. Таблиця "chamber" містить унікальний код сушильної камери, що формується автоматично і має таку структуру: XX→SS, де XX – кількість штабелів у сушильній камері, а SS – унікальний код штабеля. Також в цій таблиці є інформація про кількість штабелів у камері та схема їх розташування вздовж неї. Таблиця "ca_field" містить інформацію про клітино-автоматне поле, зокрема кількість та розміри клітин. Таблиця "coefficients" містить інформацію про всі параметри моделювання, як початкові, які є константними, так і поточні, які змінюються з плином модельного часу. Остання таблиця "results" містить інформацію за результатами моделювання та є найбільшою серед усіх. Для відображення сутностей, атрибутів і зв'язків між ними, створено Entity-Relationship (ER) діаграму (рис. 9). Вона дає змогу краще зрозуміти, як дані будуть взаємодіяти між собою у розробленому ПЗ.

Адеже відомо, що ER-модель (від англ. Entity-Relationship model, модель "сутність – зв'язок") – модель даних, що дає змогу описувати концептуальні схеми предметної області. ER-модель використовують при високорівневому (концептуальному) проектуванні бази даних. За допомогою неї можна виділити ключові сутності та позначити зв'язки, які можуть встановлюватись між цими сутностями. Під час проектування баз даних відбувається перетворення схеми, створеної на підставі ER-моделі, на конкретну схему бази даних на основі обраної моделі даних (реляційної, об'єктної, мережної або ін.).

Для візуалізації функціональності системи з точки зору користувачів і інших системних агентів, було ство-

рено діаграму варіантів використання UML. Вона використовується для опису того, як система взаємодіє зі своїм оточенням, включаючи користувачів і різні процеси. За своєю структурою, ця діаграма має акторів, які взаємодіють із системою. Ці актори поділені на 4 типи, зокрема це користувачі, експерт з SolidWorks, експерт з клітинних автоматів і системний адміністратор. Кожен з них має свої права доступу та певні варіанти використання. Кожен з цих варіантів використання виконує конкретний сценарій, який система підтримує та може реалізувати. При цьому кожен сценарій деталізує послідовність дій та взаємодію між акторами та системою (рис. 10).

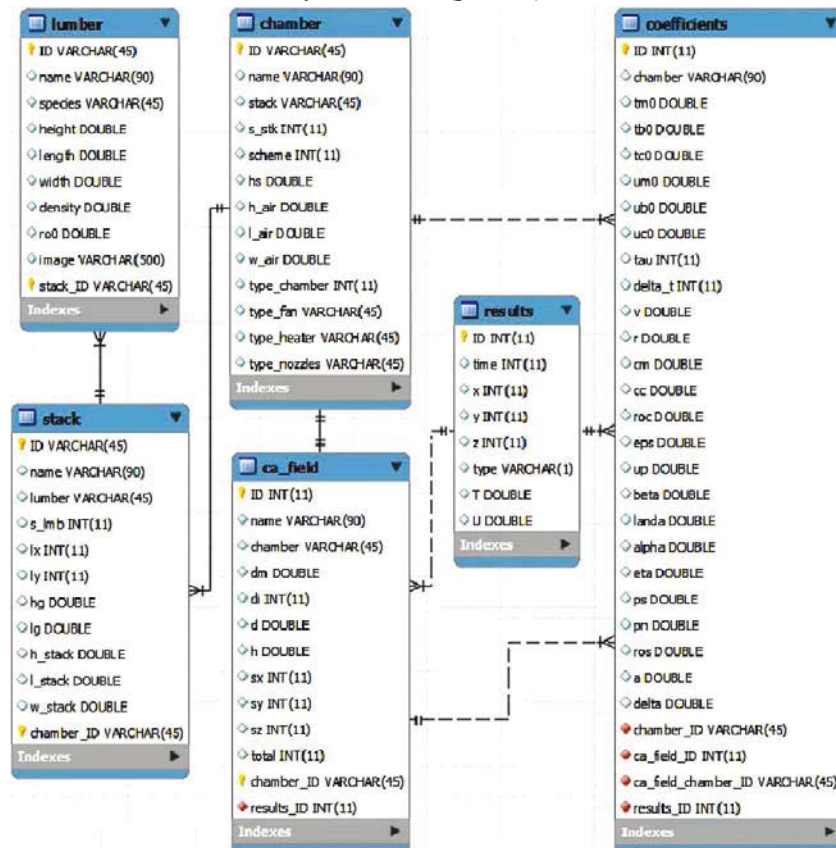


Рис. 9. Вигляд Entity-Relationship (ER) діаграми для розробленого ПЗ / View of the Entity-Relationship (ER) diagram for developed software

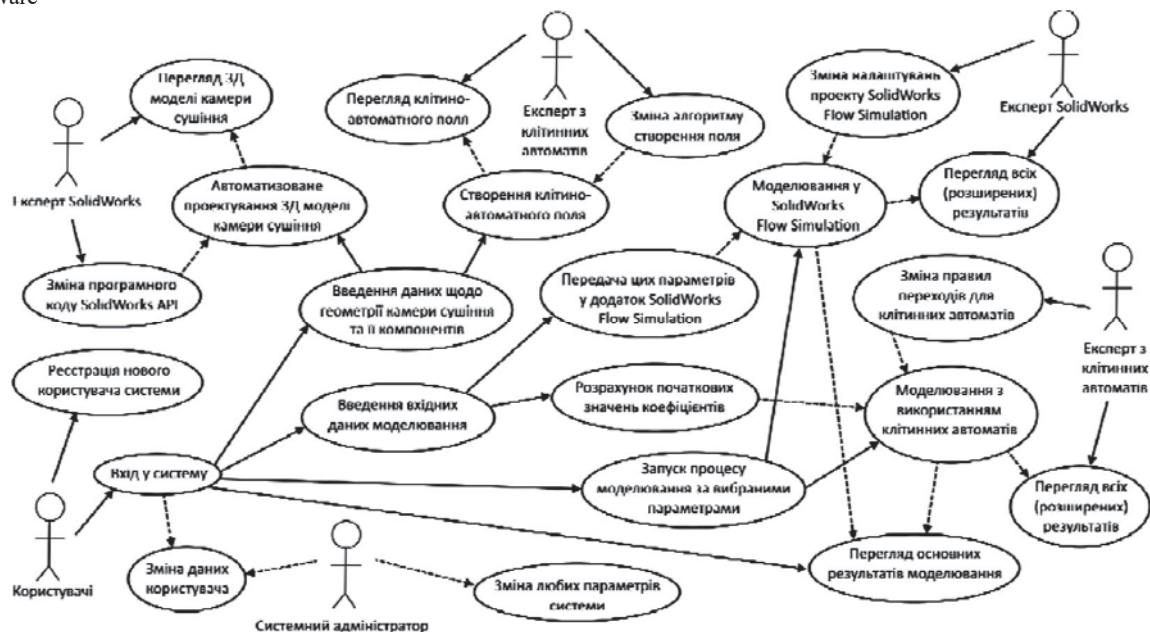


Рис. 10. Вигляд діаграми варіантів використання UML (use case diagram) / View of the UML use case diagram

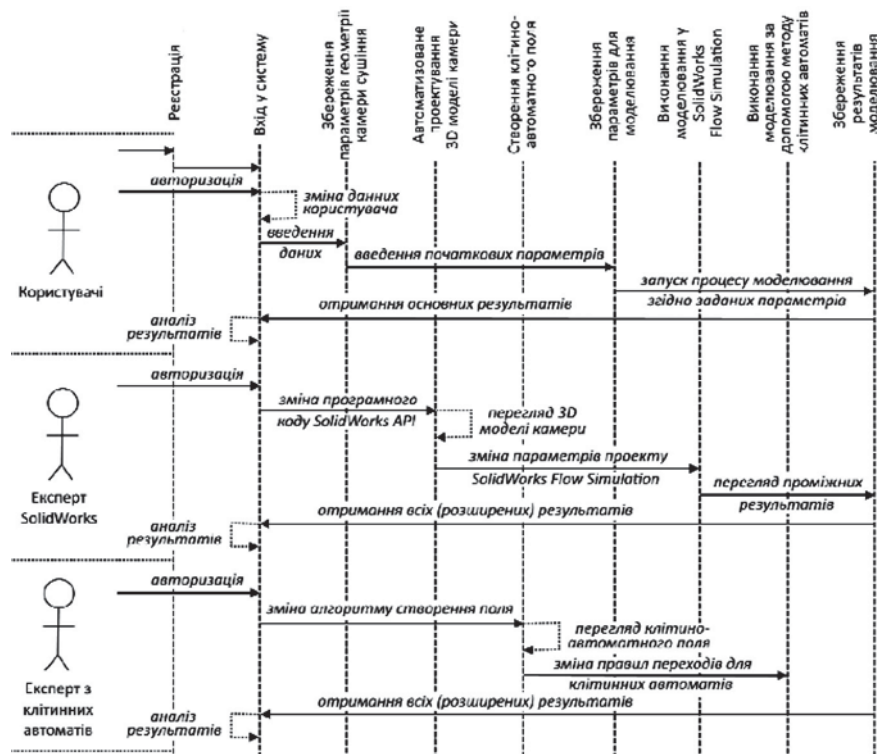


Рис. 11. Вигляд діаграми послідовності UML (sequence diagram) / View of the UML sequence diagram

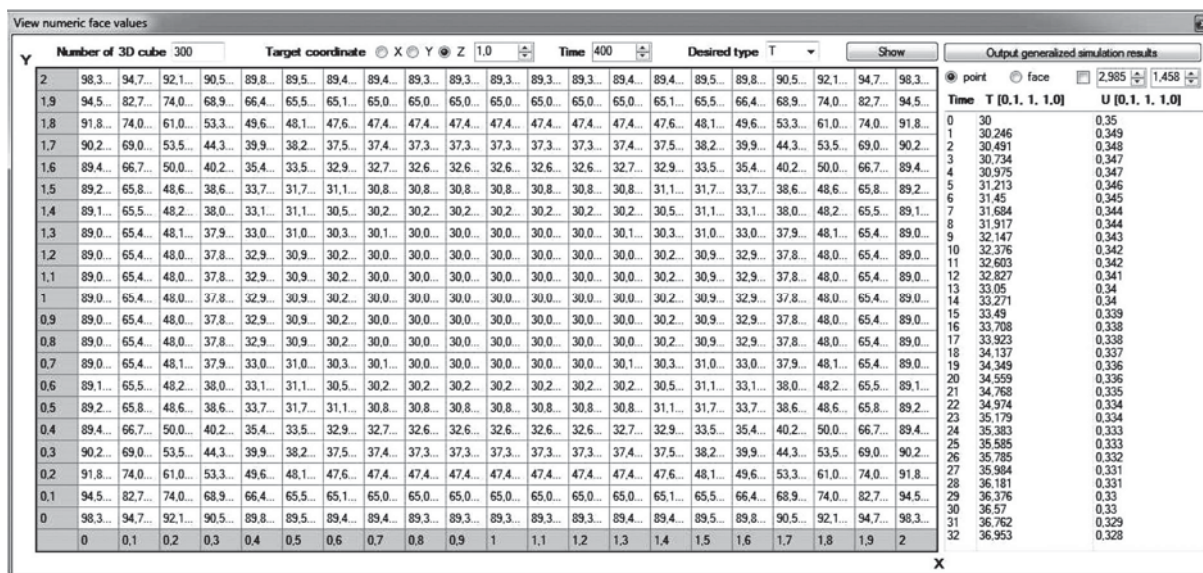


Рис. 12. Вигляд вікна "Вигляд значень", що відображає результати моделювання / View of the "Value View" window displaying simulation results

Для візуалізації взаємодії між компонентами системи в межах конкретного сценарію використання створено діаграму послідовності. Вона допомагає розуміти послідовність дій та обмін повідомленнями між різними елементами системи, що беруть участь у конкретному процесі. Загалом на цій діаграмі (рис. 11) наведено три актори та їх послідовність дій у системі.

Моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів за допомогою моделі клітинних автоматів і верифікація отриманих результатів. Після запуску, розпочинається виконання ітераційного циклу, в якому виконуються правила переходів між різними близько розташованими клітинами. Внаслідок виконання таких взаємодій, відбувається зміна основних параметрів висушувального матеріалу та агента сушіння. Як видно з рис. 13, якщо вплинути всього тільки на одну клітину, то вже за кілька ітерацій, значення будуть змінені у

27 клітинах. Такий підхід наочно демонструє принцип роботи клітинних автоматів, за якого зміна значень одних клітин [3], наприклад на поверхні піломатеріалу, точно призведе до зміни значень внутрішніх клітин. Для зручного моніторингу зміни значень температури та вологовмісту висушувального матеріалу можна скористатися вікном "Вигляд значень", що розміщений в розділі "Формат" головного меню ПЗ (рис. 12).

За допомогою цього вікна можна переглядати зміни параметрів у двовимірному просторі на клітино-автоматному полі, однак для цього потрібно зазначити початкову точку відстеження згідно з координатами (нижній лівий кут поля). Після цього можна побачити клітини, які відображають заданий параметр на вибір (температуру чи вологовміст). Для зручності отримання графічних залежностей, передбачено виведення значень основних параметрів у правій частині вікна. При цьому,

можна вибрати конкретну область на клітино-автоматному полі, у такий спосіб отримати значення шуканого параметра у просторі та часі.

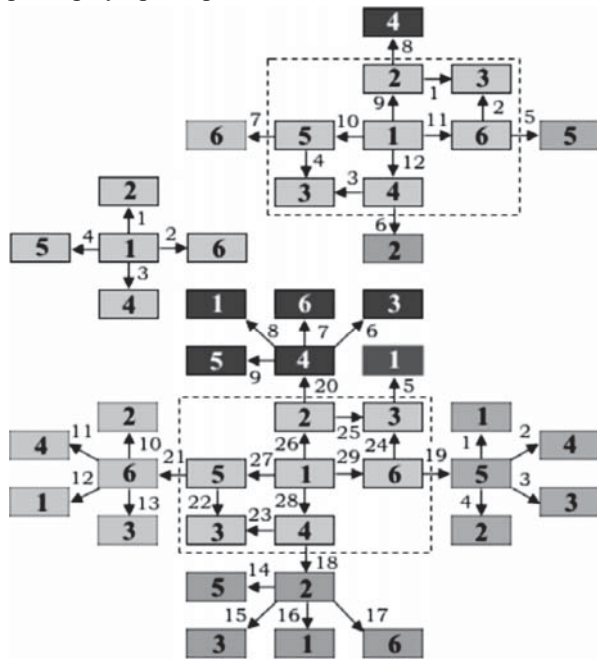


Рис. 13. Старт ітераційного циклу / Start of the iteration cycle

Унаслідок проведеного моделювання [13] отримано графічні залежності основних параметрів висушувачого матеріалу та агента сушіння в часі (рис. 14). До основних параметрів можна віднести: середня температура агента сушіння (P_a^T), середня відносна вологість агента сушіння (P_a^U), середня температура висушувачого матеріалу у штабелях (P_m^T) та середній вологовміст висушувачого матеріалу у штабелях (P_m^U).

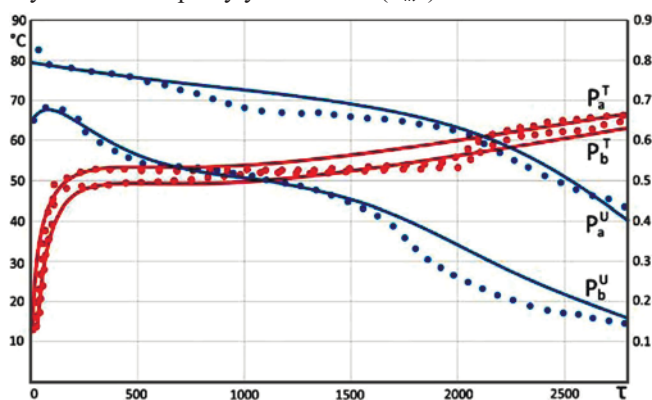


Рис. 14. Графік зміни основних параметрів P_a^T , P_m^T , P_a^U , P_m^U (позначено лініями) відносно часу та експериментальних даних (позначені точками) / Chart depicting the variation of the key parameters P_a^T , P_m^T , P_a^U , P_m^U (indicated by lines) over time, alongside experimental data (marked with dots)

Для верифікації отриманих результатів здійснено їх порівняння з експериментальними даними, які були отримані з використанням лісосушильної камери типу "LK-ZDR-100", що розташована у ТОВ "Родорс", за адресою: Україна, Хмельницька область, м. Славути. Дані було зібрано за допомогою датчиків у період з 18.03.23 по 28.03.23. У ролі капілярно-пористого матеріалу обрано деревину породи сосна завтовшки 45 мм і початковим вмістом вологи 65 %.

Для порівняння, визначено показники відносної похибки середнього значення вологовмісту на поверхні

висушувачого матеріалу. Ці показники було обрано, оскільки вони мають найбільше значення у процесі моделювання і їх точність є критично важливою. Унаслідок розрахунків встановлено, що середнє значення відносної похибки становить 9 %. Найбільші показники цієї похибки, що становлять приблизно 17 %, були зафіксовані в другій половині процесу моделювання. Це може свідчити про те, що в початковій фазі моделювання використовувалася обмежена кількість клітин на полі клітинних автоматів і обмежені правила переходу між ними. З плином часу кількість клітин збільшується, і точність результатів значно покращується. Отже, значення похибки по завершенню моделювання не перевищує 7 %. Цей аналіз підтверджує точність та відповідність отриманих результатів реальним умовам сушіння, роблячи розроблене ПЗ корисним для подальших практичних застосувань у відповідній галузі. Окрім цього, результати моделювання можуть бути використані у визначенні оптимальних вхідних параметрів для моделювання у програмах для обчислювальної гідродиніки (CFD), включаючи SolidWorks Flow Simulation.

Обговорення результатів дослідження. Тематика дослідження нова. З огляду на зацікавленість у комп'ютерному моделюванні і вдосконаленні автоматизованого проектування, багато науковців досліджують цю проблему. Зокрема, у роботі [15] розроблено тривимірну математичну модель теплового та вологісного обміну під час сушіння деревини в сушильних камерах, яка була успішно перевірена за допомогою чисельних симуляцій та експериментів, враховуючи зміни параметрів. У роботі [4] проаналізовано процес тепло- та масоперенесення під час високотемпературного оброблення деревини, що дає змогу оцінити взаємозв'язок між змінами температури та вологовмістом в деревині у його агенті сушіння. Окрім цього, деякі автори [5, 6] також застосовують можливості автоматизованого проектування для виконання суміжного класу задач. Для проведення досліджень, деякі автори вдаються до застосування розроблених ними моделей клітинних автоматів [1].

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розроблено багаторівневу архітектуру ПЗ для автоматизованого проектування 3D-моделей сушильних камер та моделювання процесів сушіння у них, яка містить алгоритми для графічного представлення, опрацювання, доступу до даних та їх сховища.

Практична значущість результатів дослідження – розроблено та програмно реалізовано алгоритми автоматизованого проектування 3D-моделі сушильної камери та її представлення у вигляді клітино-автоматного поля, що дає змогу застосовувати клітинні автомати при моделюванні процесу сушіння у ній.

Висновки / Conclusions

Унаслідок виконання цього дослідження розроблено ПЗ для автоматизованого проектування тривимірних моделей сушильних камер для капілярно-пористих матеріалів у середовищі SolidWorks. Для досягнення цієї мети використано SolidWorks API та мову програмування C#. Особливу увагу приділено програмній реалізації параметризації кожного з компонентів 3D-моделі сушильної камери. Ця задача була особливо складною

через різноманітність параметрів і можливих варіацій деяких компонент. При цьому автоматизоване проектування 3D-моделей штабелів здійснюється залежно від вибраних параметрів капілярно-пористих матеріалів, а також їх кількості. Однією із основних функцій розробленого ПЗ є можливість створення клітино-автоматного поля згідно з параметрами спроектованої 3D-моделі сушильної камери. Для цього у роботі подано схему представлення та відповідний алгоритм розбиття. Окрім цього, використано графічний інструментарій для моделювання структури, поведінки та взаємодії компонент системи, зокрема створено діаграми класів, послідовності та варіантів використання засобами UML. Для збереження даних користувачів, вхідних значень, значень коефіцієнтів і проміжних результатів моделювання по кожній з клітин, створено відповідну БД. Вона створена з використанням реляційної моделі даних, що дає змогу організувати та зберігати дані у вигляді таблиць з відносинами між ними.

References

1. 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>
2. Chopard, B., & Droz, M. (1998). Cellular automata modeling of physical systems. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511549755>
3. Ilachinski, A. (2001). Cellular automata: a discrete universe. World Scientific Publishing Company, 840. <https://doi.org/10.1142/4702>
4. Kadem, S., Lachemet, A., Younsi, R., & Kocaefe, D. (2011). 3 d-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>
5. Kyratsis, P., Tzotzis, A., & Manavis, A. (2021). Computational design and digital fabrication. In *Advances in Manufacturing Systems*, Springer Singapore, 1–16.
6. Li, G., Li, Y., & Chen, Q. (2012). Cad/cae system for wooden package based on solidworks. *Applied Mechanics and Materials*, 200, 487–491.
7. Mende, F. F., & Shurupov, I. A. (2015). Simple Camera for High-Quality Wood Drying. *Engineering and Technology*, 2(3), 95–117.
8. 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>
9. Rozhak, P. I., & Boretska, I. B. (2012). Automated design and research of wood drying chambers using SolidWorks API and COSMOS-FLOWWORKS. Coll. theses based on the materials of the VII Scientific and Technical Conference "Actual Problems of Computer Technologies" (APKT-2012), 270–279. [In Ukrainian]
10. Shumilyak, L., Zhikharevych, V., & Ostapov, S. (2018). Study of the method of asynchronous cellular automata when applied in heat conduction problems. *Information processing systems*, 1(152), 74–79. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.152.11>
11. Sokolovsky, Y. I., & Sinkevich, O. V. (2023). Development of a cellular automaton model for simulating the drying process of capillary-porous materials in periodic chambers. *Computer systems of design. Theory and practice*, 5(1), 13–18. [In Ukrainian]
12. 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>
13. 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>
14. Yevseenko, O. M., Olshevskiy, A. V., & Leshchenko, V. M. (2022). Automated control system of a periodic drying chamber. *Technical engineering*, 2(90), 52–58. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-52-58](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-52-58)
15. 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>

O. V. Sinkevych¹, Ya. I. Sokolovskyy²

¹ Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

² Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

AUTOMATED DESIGN OF THE 3D MODEL OF THE DRYING CHAMBER

In this work, software for the automated design of a 3D model of a drying chamber is developed, with its functional capabilities and graphical interface discussed. The software includes the possibility of using an asynchronous cellular automaton model for simulating the drying process of capillary-porous materials. The software is the result of the program implementation of several algorithms, including the algorithm for the automated design of the 3D model of the drying chamber using SolidWorks API tools, the algorithm for representing the studied 3D model in the form of a cellular automaton field, the algorithm for calculating input data for modeling, the algorithm for using transition rules for the asynchronous cellular automaton model, the algorithm for storing and outputting modeling results, and the algorithm for comparing modeling results. The software is implemented in the Microsoft Visual Studio 2020 Community Version programming environment using the C# programming language. For data storage and management, a relational database management system is applied using the MySQL Workbench 6.5 environment. An appropriate ER diagram is developed to illustrate the relationship between entities in the database. Several UML diagrams are created to model and visualize various aspects of the software, including a class diagram, a sequence diagram, and a use case diagram. The functionality of the software is verified by simulating the drying process of capillary-porous materials using the example of pine. Modeling is performed using transition rules for an asynchronous cellular automaton model. The software allows for comparing the obtained modeling results with experimental data by loading and matching them, and the relative error calculated during the verification does not exceed 10 %, indicating the correct operation of the software and the generation of accurate and reliable results. Overall, the developed software extends the possibilities of using cellular automaton models in simulating the drying process of capillary-porous materials and can be a valuable tool for designing new and more efficient drying chambers, as it provides the capability to design, simulate, and analyze research results.

Keywords: drying of capillary-porous materials; SolidWorks API; ER diagram; MySQL Workbench; UML diagrams; Relational Database Management System.