

та напружень в матеріалі. Вивчення цих залежностей може сприяти розвитку методів контролю температур і внутрішніх напружень у середині зразка деревини. Зауважимо вплив навантаження на сталу часу поляризації вологи зразка, як показника інтенсивності взаємодії води і деревини, може пояснити залежність швидкості сушіння від механічних напружень [4]. У сукупності ці явища логічно пояснюють гістерезис сорбції. Докладніше вивчення цих питань методами ДІМ потребує розробки спеціальних експериментів. Результати проведених досліджень показали, що зміни сталих часу поляризації вологи у різних напрямках під час сушіння зразка мають істотні особливості. Це свідчить про можливість вивчення структурних аспектів будови деревини за допомогою ДІМ.

Чудінов Б.С. дійшов до висновку про можливість появи вільної вологи в деревині, внаслідок конденсації її з пари у капілярах розміром більш за 100 нм. Але цей розмір капіляра було обрано як граничний, виходячи не з властивостей води в деревині. Чи набуває частина гігроскопічної вологи властивостей вільної води має відповісти експеримент, який готується зараз до проведення. Важливим, цікавим, але поки що не здійсненим залишається розділення струмів адсорбційної вологи та деревинної речовини. Вирішення такої задачі дасть змогу отримати кількісну оцінку адсорбованої фази вологи та щільності деревини. Така оцінка дала б змогу компонувати штабелі пилопродукції за критерієм рівності енергетичних витрат і режиму сушіння. Принципово алгоритм отримання таких результатів розроблено, але для експериментальної перевірки досяжної точності необхідний час на підготовку та проведення численних вимірювань і досліджень різних порід деревини.

Для використання позитивних властивостей ДІМ у технологічних процесах необхідно вирішити конструктивні та технологічні питання, починаючи з розробки спеціалізованих приладів, програми та методики їх перевірки, методики оцінювання стану вологи в деревині, визначення кількості кожної фази вологи за параметрами струмів поляризації і до створення нових технологій гідротермооброблення деревини. Для наукових досліджень використання ДІМ дає змогу провести нові експерименти та уточнити положення.

Література

1. Колосовская Е.А. Физические основы взаимодействия древесины с водой / Е.А. Колосовская, С.Р. Лоскутов, Б.С. Чудинов. – Новосибирск : Изд-во "Наука". Сиб. отд-ние, 1989, – 216 с.
2. ГОСТ 6782.1-75. Пилопродукция из древесины хвойных пород. Величина усушки.
3. Серговский П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины / П.С. Серговский. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1975.
4. Борисов В.М. Экспериментальная проверка зависимости электричного опору та втрат вологи від механічних напружень у процесі сушіння деревини / В.М. Борисов, І.Р. Кенс, Б.П. Поберейко // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.5. – С. 129-138.

Борисов В.М., Кенс И.Р. Исследование фазового состояния влаги в древесине диэлькометрическим импульсным методом

Рассмотрен принцип действия разработанного авторами диэлькометрического импульсного метода (ДИМ). Описаны отдельные результаты исследования этим ме-

тодом состояния влаги в древесине, показано значение полученных результатов для решения неотложных проблем древоведения. В частности, определена граница микрокапиллярной влаги и ее зависимость от температуры в диапазоне 10-90 °С, рассчитано количество адсорбированной и микрокапиллярной влаги на границе гигроскопичности. Описаны основные направления применения и перспективы развития технических средств и технологии с использованием ДИМ.

Ключевые слова: древесина; свободная, связанная, адсорбированная и микрокапиллярная влага, поляризация.

Borisov V.M., Kens I.R. Study of phase of moisture in the timber by the pulse dielectric method

This article describes the principle of operation developed by the authors dielectric pulse method (DPM), some results of the research with DPM the state of moisture in wood, shows the importance of the results for the solution of urgent problems of wood science. Specifically defined boundary microcapillary moisture and its dependence on temperature in the range 10-90 °C, the calculated amount of adsorbed and microcapillary moisture for border hygroscopicity. shows the basic directions of application and prospects of technical means and technologies using DPM.

Keywords: wood; free, bound, adsorbed and micro-capillary moisture, polarization.

УДК 536.8:621.1

Доц. О.С. Мачуга, канд. фіз.-мат. наук;

студ. В.В. Драбик; студ. М.М. Панасюк – НЛТУ України, м. Львів

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ДІЮЧОЇ МОДЕЛІ ДВИГУНА СТІРЛІНГА

Використання енергії відновних джерел для потреб лісозаготівлі пов'язане з необхідністю перетворення теплової енергії від спалення відходів деревини в механічну. Вирішення такого завдання можливе зокрема за умови використання теплової машини – двигуна Стірлінга. Подано результати експериментальних досліджень режимів роботи та визначення деяких параметрів моделі такого двигуна. Ці результати можна надалі використовувати під час розроблення та впровадження енергетичних комплексів, пов'язаних із відновними джерелами.

Ключові слова: енергія відновних джерел, двигун Стірлінга, експеримент.

Вступ. Ефективне використання енергії відновних джерел передбачає споживання її не тільки у вигляді тепла для опалювання виробничих та житлових приміщень, але і як засіб забезпечення механічною енергією машин та обладнання, зокрема у лісовій промисловості [1]. Це зможе привести як до покращення екологічного стану довкілля, так і до здешевлення продукції, оскільки актуальні енергетичні засоби з невідновних джерел – рідкі палива та електроенергія, добуті шляхом спалення вугілля чи природного газу, перероблення нафти або внаслідок ядерної реакції – частково або повністю можна замінити енергетичними засобами відновних джерел: біомаса (відходи лісозаготівлі та лісоперероблення) та гідроресурси малих річок [2, 3]. Один із напрямів перетворення теплової енергії згоряння біомаси в механічну енергію – використання теплових машин, пов'язаних із термодинамічним циклом Стірлінга.

Основний виклад. Об'єкт дослідження – діюча модель двигуна Стірлінга акустичного типу (рис. 1).

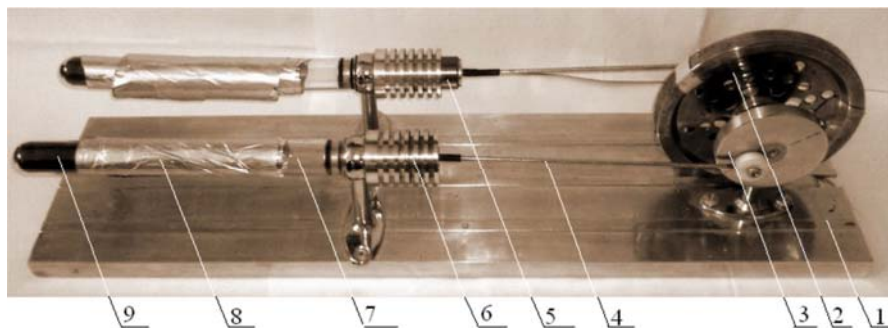


Рис. 1. Фото діючої моделі двигуна Стірлінга акустичного типу: 1) основа; 2) велике махове колесо кривошипно-шатунного механізму; 3) мале колесо; 4) штовхач; 5) поршень; 6) охолоджувач; 7) циліндр (скляна жаростійка колба); 8) металева фольга (розсікач полум'я); 9) металева стружка (теплоаккумулятор)

Робота моделі двигуна відбувається подальшим чином. Після запалювання палива (сухого спирту) та досягнення полум'ям відповідної інтенсивності, поршні здійснюють зворотно-поступальний рух, викликаючи обертання малих та великого махових коліс. Швидкість обертання зростає від нуля до деякої максимальної величини, яка залежить від конструктивних особливостей моделі, термодинамічних процесів, що відбуваються під час роботи та сумарних сил опору, зокрема опору повітря. На рис. 2 подано діаграми залежності частоти обертання великого махового колеса від часу горіння палива.

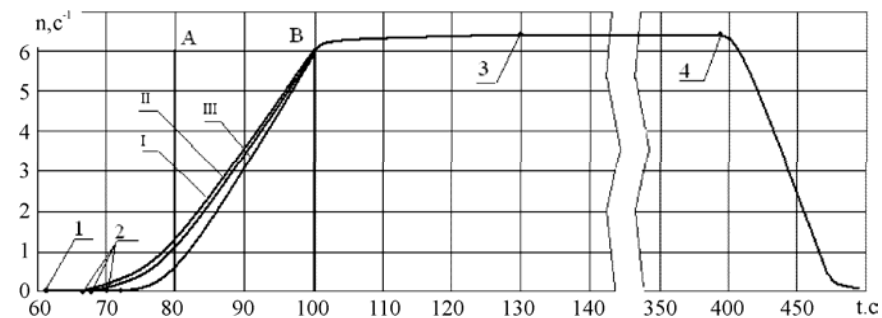


Рис. 2. Діаграма залежності частоти обертання великого махового колеса n від часу горіння палива t : 1) початок горіння; 2) початок обертання колеса; 3) досягнення максимальної швидкості обертання; 4) початок сповільнення

На рис. 2 крива I відповідає роботі моделі двигуна Стірлінга без зовнішнього навантаження, криві II, III побудовано для випадків розміщення додаткових мас на зовнішньому колі великого махового колеса ($m_{II} = 10\text{г} = 0,01\text{кг}$, $m_{III} = 20\text{г} = 0,02\text{кг}$). Частоту визначали шляхом сповільнення відеофіксації дослідів.

Характеристики роботи діючої моделі двигуна Стірлінга отримано з диференційного рівняння обертання руху твердого тіла навкруг нерухомої осі [4]:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \sum_i \text{mom} F_i, \quad (1)$$

де: J – сумарний осьовий момент інерції махових коліс; $d\omega$ – зміна кутової швидкості протягом малого проміжку часу dt , $\sum_i \text{mom} F_i$ – сума моментів усіх

діючих сил відносно осі обертання. Для розглядуваного випадку

$$\sum_i \text{mom} F_i = M_{KP} - M_{OP}^1 - M_{OP}^2, \quad (2)$$

де: M_{KP} – крутний момент, який надається штовхачами поршнів двигуна маховим колесам; M_{OP}^1 – сумарний момент опору сил механічного тертя; M_{OP}^2 – теж саме для сил опору повітря. Із зіставлення виразів (1) та (2) отримаємо:

$$M_{KP} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_{OP}^1 + M_{OP}^2, \quad (3)$$

Із (3) для ділянки АВ діаграми (рис. 2), в припущенні що обертання махового колеса є рівноприскореним, а сума моментів усіх діючих сил – постійна протягом розглядуваного проміжку часу, приймаючи $M_{OP}^2 \approx 0$, отримаємо:

$$M_{KP} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_{OP}^1, \quad (4)$$

а на ділянці 3-4, де кутове пришвидшення $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} \approx 0$:

$$M_{KP} = M_{OP}^1 + M_{OP}^2. \quad (5)$$

Для обчислення крутного моменту визначено сумарний осьовий момент інерції:

$$J = J_1 + 2 \cdot J_2 + J_m - J_{OTB}, \quad (6)$$

де: J_1 – момент інерції великого махового колеса без врахування отворів у ньому (матеріал – сталь), J_2 – момент інерції малого махового колеса (матеріал – дюралюміній), J_m – момент інерції додаткової точкової маси у випадках II та III, J_{OTB} – сумарний момент інерції усіх точкових мас, що відповідають отворам у великому колесі. Геометричні розміри коліс розглядуваної моделі подано відповідно до схеми (рис. 3): $R = 4,65 \cdot 10^{-2}\text{м}$, $\delta = 0,9 \cdot 10^{-2}\text{м}$, $b_1 = 3,95 \cdot 10^{-3}\text{м}$, $b = 4,45 \cdot 10^{-3}\text{м}$, $d_1 = 7,5 \cdot 10^{-3}\text{м}$, $d_2 = d_3 = 5 \cdot 10^{-3}\text{м}$; радіуси центрів отворів у великому маховому колесі (на схемі не показано): $R_1 = 1,5 \cdot 10^{-2}\text{м}$, $R_2 = 2,37 \cdot 10^{-2}\text{м}$, $R_3 = 3,12 \cdot 10^{-2}\text{м}$, $b_0 = 6,6 \cdot 10^{-3}\text{м}$, $r = 2,44 \cdot 10^{-2}\text{м}$.

Осьові моменти інерції обчислюють за такими виразами:

$$J_1 = \pi \cdot \rho_{CT} \cdot \left[R^4 \cdot b - (R - \delta)^4 \cdot (b - b_1) \right], \quad J_2 = \pi \cdot \rho_{ДА} \cdot \frac{r^4 \cdot b_0}{2}, \quad J_m = m \cdot R^2, \quad J_{OTB} = 2 \cdot \pi \cdot \rho_{CT} \cdot (b - b_1) \cdot (d_1^2 \cdot R_1^2 + 2 \cdot d_2^2 \cdot R_2^2 + d_3^2 \cdot R_3^2), \quad (7)$$

де ρ_{CT} , $\rho_{ДА}$ – густина сталі та дюралюмінію відповідно. Після виконання обчислень з (6) та (7) отримуємо: $J_I = 3,35 \cdot 10^{-4}\text{кг} \cdot \text{м}^2$ для випадку $m = 0$; $J_{II} = 3,57 \cdot 10^{-4}\text{кг} \cdot \text{м}^2$ для випадку $m = m_{II}$; $J_{III} = 3,78 \cdot 10^{-4}\text{кг} \cdot \text{м}^2$ для випадку $m = m_{III}$.

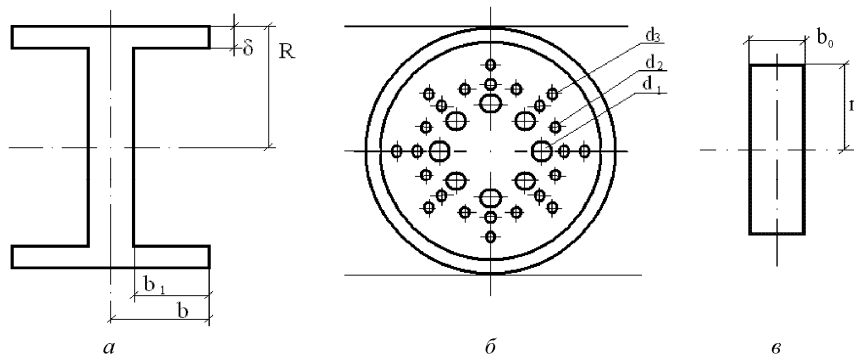


Рис. 3. Схема махових коліс: а, б – велике, в – мале

Момент сил опору, викликаних механічним тертям M_{OP}^1 (в припущенні, що M_{OP}^1 є однаковим як для стану спокою, так і для обертання колеса в невеликому швидкісному діапазоні), визначено згідно зі схемами (рис. 4). Встановлено, що $m_0 = 13,52 = 0,0135$ кг – маса розглядуваного тягарця, який викликає початок обертання махового колеса, тоді $M_{OP}^1 = G \cdot R = 6,16 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}$.

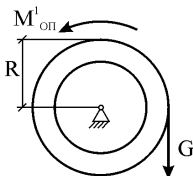


Рис. 4. Схема для визначення M_{OP}^1 , де $G = m_0 \cdot g$ – вага вантажу m_0

Кутове пришвидження ε на ділянці АВ (рис. 2) можна визначити в припущенні його незмінності: $\varepsilon = \text{const}$, тоді $d\omega = \Delta\omega = 2 \cdot \pi \cdot \Delta n$, $dt = \Delta t$. На рис. 5 подано залежність характеристик моделі двигуна: M_{KP} , M_{OP}^2 та $N_{max} = M_{KP} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{max}$ від маси тягарця на великому маховому колесі – m .

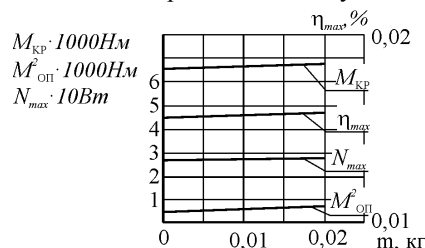


Рис. 5. Характеристики моделі двигуна Стірлінга

Для забезпечення розгону двигуна від 0 до n_{max} використано теплову енергію від згорання частини двох таблеток сухого спирту. З аналізу відеоматеріалів слідує, що велике колесо моделі починає обертатись тоді, коли вигорає $\approx 8\%$ об'єму палива, час розгону колеса до максимальної швидкості $\approx 55-65$ с, за цей час вигорає $\approx 25\%$ об'єму таблеток. Отже, на ділянці 2-3 діа-

рами, згорає $\approx 17\%$ початкового об'єму цього палива. Вважаючи в розглядуваних інтервалах інтенсивність горіння постійною, визначимо, що на ділянці АВ діаграми вигорає близько $5,5\%$ об'єму палива. Теплотворна здатність двох таблеток уротропіну $Q = q \cdot m = \rho \cdot q \cdot V = 6,59 \cdot 10^5 \text{ Дж}$, де $\rho = 1330 \text{ кг/м}^3$ – його густина [5], $q = 31,3 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ – теплотворна здатність [6], $V = 1,583 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ – об'єм двох таблеток сухого спирту.

Коефіцієнт корисної дії η моделі двигуна визначимо із відношення:

$$\eta = \frac{M_{KP} \cdot 2\pi \cdot n}{a \cdot Q / T}, \quad (8)$$

де a – відсоток вигорання сухого спирту протягом часового інтервалу T . З (8) випливає, що коефіцієнт корисної дії прямо пропорційний до швидкості обертання махового колеса та змінюється від нуля до певного максимального значення η_{max} . Для розглядуваного випадку залежність η_{max} від маси тягарця m наведено на рис. 5.

Аналіз отриманих результатів. Робота моделі двигуна Стірлінга вказує шлях отримання механічної енергії із теплової енергії, джерелом якої може бути біомаса – відходи лісозаготівлі та перероблення деревини. Висхідний характер побудованих кривих свідчить про навантажувальну функцію зовнішніх зусиль: із збільшенням корисного навантаження на двигун, його силові характеристики – крутний момент та потужність – зростають. Тому під час подальших досліджень потрібно розширити діапазон та вид зовнішніх навантажень на двигун.

Невисокі значення коефіцієнта корисної дії пояснюємо значними незворотними тепловими втратами під час передачі тепла від згорання палива в робочу зону двигуна та втратою теплової енергії в охолоджувачі. Збільшення ефективності роботи моделі можливе за рахунок модернізації зони згорання палива, контролювання інтенсивності його горіння шляхом регулювання доступу повітря. Для практичного зацікавлення двигуном потрібно використовувати більш довговічні матеріали для його корпусу. Певний інтерес викликає порівняльний аналіз характеристик інших типів двигуна Стірлінга

Література

1. Библюк Н.І. Про використання гідроприводу у відборі та передачі енергії відновних джерел у лісозаготівлі. Зменшення тепловиділення / Н.І. Библюк, Н.Н. Библюк, О.С. Мачуга // Промислова гідравліка та пневматика. – 2007. – № 4(18). – С. 12-15.
2. Мачуга О.С. Засади інтегрованого використання енергії відновних джерел у лісозаготівлі / О.С. Мачуга // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2010. – Вип. 20.7. – С. 58-64.
3. Библюк Н.І. Розроблення технології інтегрованого використання різнорідних відновних джерел енергії у лісозаготівлі, транспортуванні та первинній переробці деревини : звіт про наук.-дослідну роботу ДБ № 08.15-26-10 (заклучний) / Н.І. Библюк, О.С. Мачуга, О.А. Стиранівський, М.І. Герис, А.А. Бойко, М.М. Борис, та ін. / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, НЛТУ України, Львів, 2011. – 93 с.
4. Павловський М.А. Теоретична механіка : підручник / М.А. Павловський. – К. : Вид-во "Техніка". – 2002. – 512 с.
5. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://uk.wikipedia.org/wiki/Уротропін>.
6. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://ru.wikipedia.org/wiki/Тексаметилентетрамин>.

Мачуга О.С., Драбык В.В., Панасюк Н.Н. Исследование особенностей работы действующей модели двигателя Стирлинга

Использование энергии возобновляемых источников для нужд лесозаготовки связано с необходимостью превращения тепловой энергии от сжигания отходов древесины в механическую. Решение такого задания возможно в частности путем использования тепловой машины – двигателя Стирлинга. Представлены результаты экспериментальных исследований режимов работы и определения некоторых параметров модели такого двигателя. Эти результаты могут в дальнейшем использоваться при разработке и внедрении энергетических комплексов, связанных с возобновляемыми источниками.

Ключевые слова: энергия возобновляемых источников, двигатель Стирлинга, эксперимент.

Machuga O.S., Drabyk V.V., Panasyuk M.M. The stirling engine operating model's work characteristics investigation

The renewable energy sources using for logging purposes is connect with the necessity to convert thermal energy from burning wood waste into the mechanical energy. Solving this problem is possible in particular by using the heat machine – Stirling engine. The investigation results by the experimental way of the engine's model work modes and definitions of their some parameters are present in this article. These results may be used further during the development and implementation connected with the energy renewable sources complexes.

Keywords: renewable sources energy, the Stirling engine, the experiment.

УДК 004.942:674.047

Аспір. Ю.В. Прусак¹ – НЛТУ України, м. Львів

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ І ВОЛОГОСТІ У ПРОЦЕСІ СУШІННЯ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ ТІЛ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЗАКОНУ ДАЛЬТОНА

Наведено математичну модель для дослідження розподілу температури і вологості у деревині в процесі сушіння. Граничні умови, які описують взаємодію деревини з агентом сушіння, записано на основі закону Дальтона. На основі різницевого методу наведено алгоритм для чисельної реалізації математичної моделі.

Ключові слова: математична модель, закон Дальтона, сушіння капілярно-пористих матеріалів, вологоперенесення, різницевий метод, метод прогонки.

Для моделювання вологоперенесення у процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів переважно використовують диференціальні рівняння перенесення вологи [1, 2] з лінійними граничними умовами Ньютона, коли інтенсивність масообміну між висушуваним матеріалом та агентом сушіння є пропорційною різниці між вологовмістом на поверхні матеріалу U_n і рівноважним вологовмістом U_p :

$$j_n = \beta(U_n(\tau) - U_p), \quad (1)$$

де β – коефіцієнт вологоперенесення, віднесений до перепаду вологовмісту.

Такий підхід дає змогу отримувати аналітичні та чисельні розв'язки рівнянь масоперенесення, які наведено як у вітчизняних, так і закордонних

виданнях [1-5]. Використання граничних умов, які описуються законом випаровування Дальтона, коли інтенсивність масообміну є пропорційною перепаду парціального тиску водяної пари за товщиною пограничного шару, найбільш повно відображає фізичні сутності процесу сушіння і збігається з експериментальними дослідженнями [6, 7].

Але використання у граничних умовах закону Дальтона

$$j_n = \alpha_p(p_{1n} - p_{1c}) \quad (2)$$

відразу вводить не лінійність у математичну модель вологоперенесення.

Формула (2), що відображає взаємодію осушувачого матеріалу з агентом сушіння, є справедливою для стаціонарних процесів. Для нестаціонарних процесів коефіцієнти вологообміну α_p , віднесені до різниці парціальних тисків, є функцією часу.

Як зазначено у [6], використання граничної умови у вигляді співвідношення (1) не лише суперечить з експериментальними дослідженнями [7], але й не узгоджується з теоретичними засобами, наприклад для режиму сталої швидкості сушіння, вологовміст у будь-якій точці матеріалу зменшується у часі за лінійними законами з однією й тією ж швидкістю ($\partial U / \partial \tau = const$). Однак отримані у роботі [5] аналітичні залежності розподілу вологовмісту з використанням граничних умов (1) змінюються у часі за законом, близьким до експоненціального. Тому у подальшому розглянемо моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів з урахуванням закону Дальтона (2).

Залежність для відносного парціального тиску пари, тобто відношення парціального тиску пари до нормального атмосферного тиску, можна моделювати з допомогою формули Г.К. Філоненка

$$P(T) = 6,03 \cdot 10^{-3} \exp\left(17,3T / (T + 238 \cdot C)\right). \quad (3)$$

Тобто вважаємо, що водяна пара на поверхні висушувачого матеріалу є насиченою. Згідно з даними [7, 8], таке допущення має місце до тих пір, доки вологовміст на поверхні висушувачого матеріалу є меншим від деякого критичного значення. У формулі (3) через T позначено температуру поверхні, тобто $p_{1n} = P(T(x, \tau))$. Тиск середовища визначається формулою $p_{1n} = \phi P(T_n)$, де ϕ – відносна вологість повітря.

Сформулюємо математичну модель для визначення температури $T(x, \tau)$ та вологовмісту $U(x, \tau)$ у процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів з урахуванням граничних умов (2), (3) у такому вигляді:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right) + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial U(x, \tau)}{\partial \tau}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial U(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial U(x, \tau)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(a_U \delta \frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (5)$$

Граничні умови матимуть вигляд:

¹ Наук. керівник: проф. Я.І. Соколовський, д-р техн. наук