

УДК 66.047.45: 536.24

ЕФЕКТИВНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ БІОПАЛИВ ЗА УМОВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ

Корінчук Д.М., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

Робота присвячена визначенню ефективного коефіцієнту теплопровідності математичної моделі високотемпературного сушіння біомаси. Розроблено методику експериментальних досліджень кінетики сушіння та теоретичної обробки результатів. Представлені результати дослідження. Розраховано середнє значення ефективного коефіцієнту теплопровідності та обґрунтовано можливість застосування його в розрахунках високотемпературного сушіння біомаси.

Робота посвящена определению эффективного коэффициента теплопроводности математической модели высокотемпературной сушки биомассы. Разработана методика экспериментальных исследований кинетики сушки и теоретической обработки результатов. Представлены результаты исследования. Рассчитано среднее значение эффективного коэффициента теплопроводности и обоснована возможность применения его в расчетах высокотемпературной сушки биомассы.

The paper is devoted to determining the effective thermal conductivity coefficient of a mathematical model of high temperature drying biomass. The method of experimental research kinetics of drying and theoretical processing of the results is developed. The results of the research are presented. The average value of the effective coefficient of thermal conductivity is calculated and the possibility of its application in calculations of high temperature drying of biomass is substantiated.

Ключові слова: біомаса, деревина, кінетика сушіння, математична модель, пласка частинка, ефективний коефіцієнт теплопровідності.

Бібл. 6, табл. 1, рис. 4.

ЕКТ – ефективний коефіцієнт теплопровідності;

 τ – час сушіння; U – вологовміст; ρ – густина матеріалу; $d = 2H$ – товщина пласкої частинки; α – коефіцієнт тепловіддачі; T – температура; λ – ефективний коефіцієнт теплопровідності; L – теплота фазового переходу; δ – відносна похибка; N – кількість дослідних точок кривої кінетики сушіння.**Індекси:**

0 – початковий;

сух. – сухого матеріалу;

с. а. – сушильного агенту;

ф – фазового переходу випаровування вологи;

т – теоретично розраховане значення;

експ – експериментальне значення.

Постановка проблеми. Технології переробки біомаси в тверде гранульоване біопаливо включають стадії дроблення, сушіння та гранулювання і дозволяють нормалізувати складну для енергетичного використання сировину за вологістю, гранулометричним складом, збільшити масову та об'ємну теплоту згоряння. Усталені в часі параметри гранульованого біопалива забезпечують високу ефективність використання гранульованого біопалива в котельному обладнанні, низькі транспортні і складські витрати. Задача переробки поліфракційної вологої сировини різних видів біомаси перейшла з енергетичної сфери в технологічну і, відповідно, потребує розробки режимів, що забезпечують постійні якісні показники біопалива при мінімальних енергетичних витратах на процес. Сформульована задача на сьогодні остаточно не вирішена, а більшість виробництв біопалива в Україні працює сезонно через низьку енергоефективність роботи обладнання та відсутність методик оптимізації режимних параметрів.

Найбільш енергоємним в технологіях переробки біомаси в біопаливо є процес високотемпературного

зневоднення [1], який проводиться за температури сушильного агенту вище 140 °С. Високотемпературні процеси сушіння відрізняються високою інтенсивністю та порівняно низькими енергетичними витратами в порівнянні з низькотемпературним сушінням, але реалізація процесу потребує врахування змінних початкових параметрів біомаси. Розробка і застосування у виробництві нових ефективних способів сушіння біомаси, створення високопродуктивного сушильного обладнання, вдосконалення режимів роботи та конструктивних рішень для сушарок сприяє раціональному використанню природних ресурсів, зниженню енерговитрат та собівартості біопалива і підвищенню конкурентоспроможності виробництва. Відпрацювання режимів на виробництві потребує значних фінансових затрат та не забезпечує достатньою кількістю інформації для аналізу та обґрунтування оптимальних режимів роботи та конструкцій сушарок. Моделювання процесів високотемпературного сушіння біомаси і торфу дозволять обґрунтувати методи інтенсифікації процесу сушіння, розробити інженерні методики розрахунку обладнання і забезпе-

чити створення найбільш раціональних конструкцій сушильних установок. Розробці математичної моделі процесу сушіння біомаси рослинного та деревинного походження в технологіях виробництва твердих біопалив, яка враховує найбільш характерні сторони процесу високотемпературного сушіння частинок присвячені попередні роботи [1, 2]. За аналогією з процесами, пов'язаними з рухом границь фазового розділу, в роботі [1] припускається, що випаровування рідини здійснюється головним чином у вузькій зоні, що розповсюджується в міру сушіння в глиб матеріалу і розділяє області, зайняті паром і рідиною. Ширина зони випаровування визначається розміром клітин або пір сировини, що значно менше характерного розміру частинок та дозволяє замінити зону випаровування фронтом випаровування нехтуючи його товщиною. Отримані аналітичним шляхом рівняння дозволяють визначити час висихання частинок різного виду біомаси та різної форми до заданої вологості.

В моделі використовується коефіцієнт ефективної теплопровідності сухої зони матеріалу, який в загальному випадку враховує явища термодифузії, конвективні струми в порах, пере конденсацію парової фази, теплоперенос парами води. У першому наближенні допускається приймати коефіцієнт теплопровідності сухого матеріалу. Але для підвищення точності математичної моделі необхідно провести експериментальні дослідження величини ефективного коефіцієнту теплопровідності, а також впливу температурного режиму та властивостей біомаси на його величину.

Метою роботи є визначення ефективного коефіцієнту теплопровідності біомаси за умов високотемпературного сушіння в технологіях виробництва біопалива.

Методика та результати дослідження. Використання математичного апарату, розробленого в [1] для модельних тіл подрібненої біомаси "циліндр" та "сфера" представляє складнощі для математичної обробки результатів експерименту. Невідомою складовою, яка вносить суттєву похибку в визначення ефективного

коефіцієнту теплопровідності в даному випадку виступає фактор форми частинок. В даній роботі запропоновано в якості модельного тіла використовувати пластину, що дозволить максимально зменшити вплив фактору форми частинок. З використанням методики, обґрунтованої в [1], розроблено рівняння кінетики сушіння плоскої частинки яке пов'язує час сушіння матеріалу та його вологовміст:

$$\tau = \frac{L \cdot U_0 \cdot \rho_{\text{сyx}} \cdot H}{(T_{\text{с.а.}} - T_{\text{ф}}) \cdot \alpha} \left(1 + \frac{\alpha \cdot H}{2 \cdot \lambda_{\text{эф}}} \left(1 - \frac{U}{U_0} \right) \right) \cdot \left(1 - \frac{U}{U_0} \right). \quad (1)$$

Величина коефіцієнту α , який входить в рівняння (1) визначалась за критеріальними залежностями при конвективному позовжньому обтіканні сушильним агентом пластини [4]. В умовах експерименту розрахункова величина α знаходилась в діапазоні 38 – 76 Вт/м²·К. Температура фазового переходу на границі сухої та вологої зони частинки приймалась $T_{\text{ф}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

Об'єктом дослідження виступали зразки деревини сосни (*Pinus silvestris* L.), енергетичної верби (*Salix viminalis* L. Tora), і тополі (*Populus nigra* L.) плоскої форми із заданими параметрами товщини, отримані шляхом нарізки. Вологовміст зразків складав 1,1-1,2 кг вологи на кг сухої речовини. Густина зразків становила 520 кг/м³, 645 кг/м³ та 400 кг/м³ відповідно. Перед сушінням зразки піддавалися ударному навантаженню з метою руйнування цілісної структури клітин, що обумовлено припущеннями математичної моделі [1].

Дослідження процесу сушіння проводили на експериментальному сушильному стенді, схема якого представлена на рис. 1. Стенд складається із системи ізоляованих повітропроводів із пристроями для нагрівання й циркуляції повітря (сушильного агента), сушильних камер, систем автоматичного контролю й підтримки температури сушильного агента, збору й обробки інформації.

Сушильна камера з горизонтальним рухом сушильного агента (рис. 1) має прозорі люки, через які здійснюється завантаження зразків і спостереження за ста-

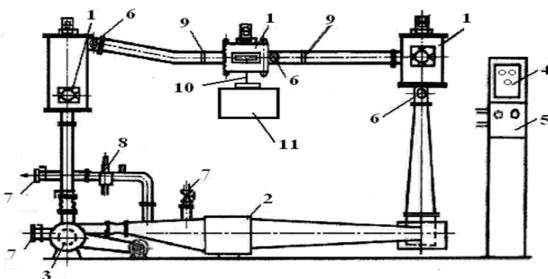


Рис. 1. Схема експериментального стенду конвективного сушіння та сушильної камери:
 1 – сушильна камера; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4 – блок регулятор температури;
 5 – пульт керування; 6 – термометри опору; 7 – патрубки з шиберами; 8 – психрометр;
 9 – решітки стабілізації потоку; 10 – штанга вагів; 11 – ваги.

ном матеріалу в процесі сушіння. Сушильний агент переміщується за допомогою відцентрового вентилятора з частотним регулюванням кількості обертів, що дозволяє плавно змінювати швидкість руху сушильного агента. Технічні характеристики експериментального сушильного стенду:

- температура теплоносія 30...200°C;
- швидкість руху теплоносія 0,5...5 м/с.

Проведена серія досліджень кінетики сушіння пластичних зразків біомаси при поздовжньому обтіканні за температур сушильного агента T_{ca} : 140 °C, 160 °C, 200 °C. Температуру сушильного агента реєстрували за допомогою термоелектричних перетворювачів, вмонтованих у спеціальні голчасті зонди. Точність вимірювання температури 0,1 °C. Тарування термоелектричних перетворювачів проводили в киплячій воді.

Швидкість повітря в сушильній камері встановлювали для всіх досліджень послідовно 1, 2, 3 та 4 м/с і контролювали за допомогою чашкового анемометра МС-13.

Дільниця теплової підготовки повітря виконана у вигляді прямокутного короба в якому розміщені електричні нагрівачі, які дозволяють підтримувати в автоматичному режимі температуру повітря. Система автоматичного регулювання складається з термометрів опору ТСМ-50, ПД-регулятора з інтерфейсом RS-485 ОВЕН ТРМ101-КР, оптодіода симетричного та електричних нагрівачів.

Стенд обладнаний автоматизованою системою збору й обробки інформації, яка об'єднує комп'ютер, цифрові ваги AD-500, прикладну спеціалізовану комп'ютерну програму "Sooshka" й канали виміру температури, що складається з аналого-цифрового перетворювача й інтерфейсу. Комп'ютерна програма дає можливість накопичувати інформацію про протікання процесу сушіння, виконувати всі необхідні розрахунки й графічні побудови.

Після встановлення на стенді режиму дослідження, на штангу ваг в сушильній камері клали камеру з горизонтально розташованими зразками в вигляді пластин з розмірами 10 x 10 мм. Товщина зразків в кожному дослідженні була однаковою та становила 2, 4, 6 мм.

Під час експерименту система збору та обробки інформації безперервно реєструвала температуру сушильного агента та зміну маси зразка. Процес сушіння вважався завершеним, коли ваги перестають реєструвати зміну маси зразка, тобто маса зразка стає незмінною. За сухою масою наважки проведені розрахунки зміни вологовмісту в часі та побудовані залежності $W = f(\tau)$ (рис. 3–5) для різних видів біомаси.

Для умов експерименту проведено розрахунок зміни вологовмісту в часі за змінного значення ЕКТ. Розраховано середнє значення відносної похибки результатів теоретичного визначення вологовмісту та даних експерименту. З використанням методів статистичного аналізу табличного процесору MS Excel виконано пошук значення ЕКТ, що відповідає мінімуму відносної похибки математичної моделі:

$$\delta(\lambda_{ef}) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{U_{\tau}(\lambda_{ef}) - U_{експ}}{U_{\tau}(\lambda_{ef})} \right| \rightarrow \min. \quad (2)$$

За результатами розрахунків побудовані теоретичні залежності кінетики зневоднення. Значення коефіцієнту ефективної теплопровідності та величини похибки теоретичної залежності занесені в табл. 1.

Обробка експериментальних даних виявила правомірність припущення в роботі [1, 2] щодо можливості в процесах високотемпературного сушіння подрібненої біомаси не враховувати період прогріву матеріалу при розрахунку часу сушіння. В дослідженнях величина періоду прогріву становила для температур 140, 160, 200 °C відповідно 4, 2, 1% від загального часу сушіння.

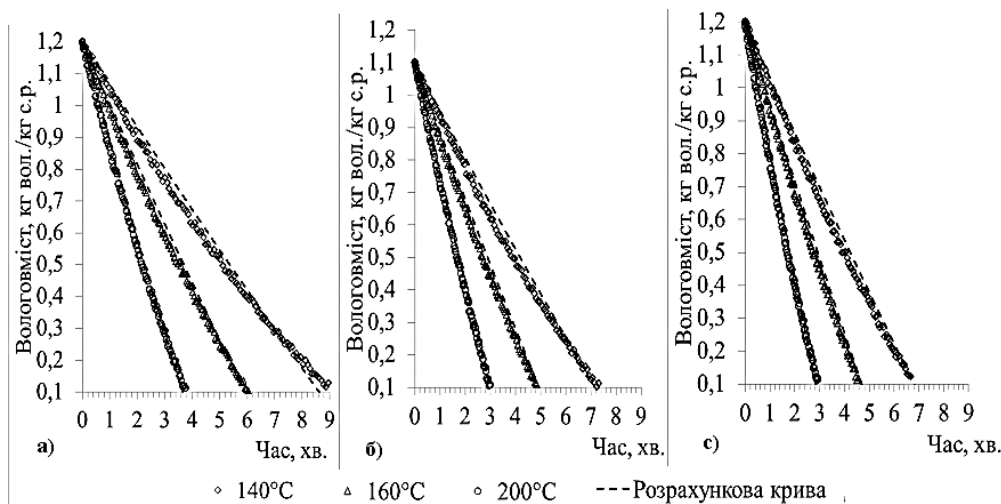


Рис. 2. Вплив температури сушильного агента на експериментальну та теоретичну залежність кінетики сушіння біомаси: а – сосни, б – верби, в – тополі. Товщина зразків $d = 2$ мм, швидкість сушильного агента 3 м/с.

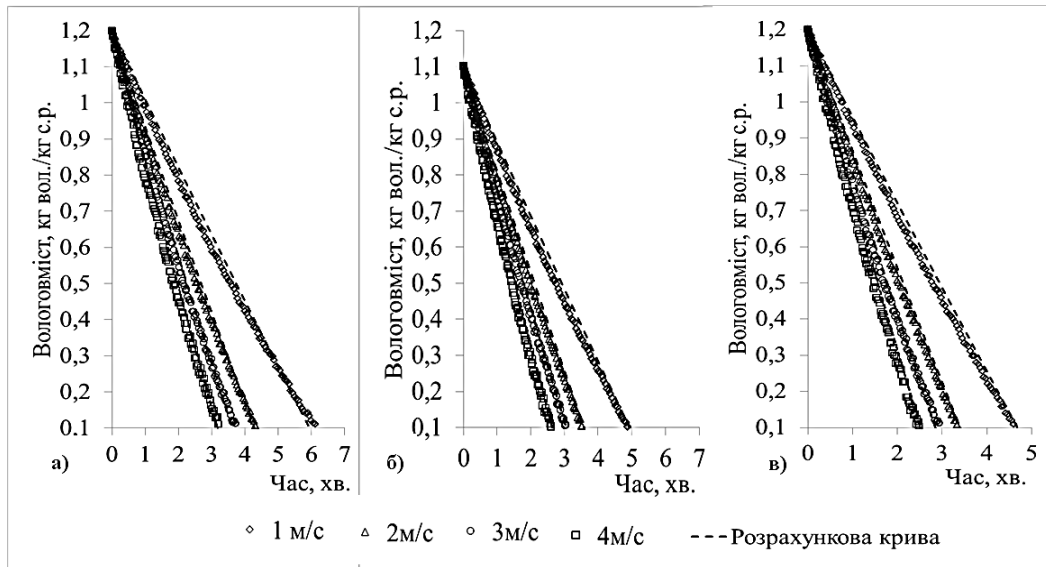


Рис. 3. Вплив швидкості сушильного агенту на експериментальну та теоретичну залежність кінетики сушіння біомаси при : а – сосни, б – верби, в – тополі. Товщина зразків $d = 2$ мм, температура сушильного агенту $T_{c.a.} = 200$ °С.

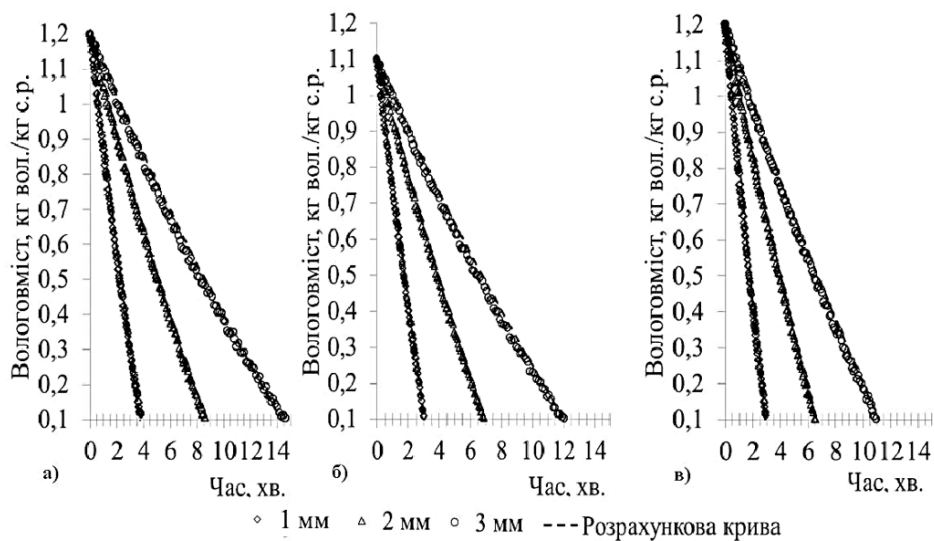


Рис. 4. Вплив товщини частинки $H = 0.5d$ на експериментальну та теоретичну залежність кінетики сушіння біомаси: а – сосни, б – верби, в – тополі. Швидкість сушильного агенту 3 м/с, температура сушильного агенту $T_{c.a.} = 200$ °С.

В промислових умовах високотемпературного сушіння з підвищенням температури сушіння період прогріву знизуватиметься більш суттєво ніж загальний час сушіння.

Проведено статистичну оцінку [5, 6] можливості застосування в інженерних розрахунках з використанням математичної моделі [1] середнього значення ЕКТ. Середнє значення ЕКТ за результатами узагальнення представленої серії досліджень склало $\lambda = 0,2215$ Вт/м·К. Середньоквадратична похибка склала 0,0038 Вт/м·К, критерій Стюдента становив 2,06, довірчий інтервал похибки з імовірністю 95% склав $\pm 0,008$ Вт/м·К, що відповідає відносній похибці середнього значення ЕКТ

$\delta_{сер} = 3,6\%$. Оскільки відносна похибка середнього значення ЕКТ не перевищує максимальну відносну похибку математичної моделі, застосування середнього значення ЕКТ припустиме для використання в інженерних розрахунках високотемпературного сушіння біомаси за математичною моделлю [1], максимальна похибка розрахунку за результатами досліджень не перевищуватиме 10 %. При цьому значення ефективного коефіцієнту теплопровідності математична модель адекватно описує експериментальні дослідження у всьому діапазоні зміни температури сушильного агенту, товщини зразків та виду біомаси.

Таблиця 1. Результати розрахунку ЕКТ та похибки математичної моделі.

Зразок біомаси	Температура, °С	Товщина зразка, $d=2 \cdot H$, мм	Швидкість сушильного агенту, м/с	Ефективний коефіцієнт теплопровідності λ_{ef} , Вт/м·К	Відносна похибка моделі, %
Сосна	140	2	3	0,238	6,4
	160			0,221	5,4
	200			0,216	4,7
			1	0,228	5,03
			2	0,219	4,6
			4	0,215	5,9
	4		3	0,213	3,9
6		0,208	5,6		
Верба	140	2	3	0,225	9,5
	160			0,216	8,5
	200			0,212	6,13
			1	0,222	8,3
			2	0,216	6,23
			4	0,21	8,9
	4		3	0,205	8,7
6		0,194	5,7		
Тополя	140	2	3	0,26	5,2
	160			0,237	3,9
	200			0,221	7,6
			1	0,243	3,8
			2	0,235	3,5
			4	0,21	5
	4		3	0,212	3
6		0,2	4,8		
Середнє значення ефективного коефіцієнту теплопровідності					0,2215

Висновки

Розроблено методику визначення ефективного коефіцієнту теплопровідності для використання в розрахунках процесу сушіння за моделлю високотемпературного сушіння біомаси [1]. В роботі експериментально досліджено кінетику високотемпературного сушіння зразків біомаси сосни, верби та тополі пласкої форми. Розроблено теоретичну залежність кінетики сушіння пласких часток та проведено розрахунки процесу високотемпературного сушіння тіл пласкої форми. За результатами дослідження методом мінімізації відносної похибки теоретичних та експериментальних результатів визначено значення ЕКТ для серії дослідів. Розраховано середнє значення ЕКТ та обґрунтовано можливість

застосування його в розрахунках високотемпературного сушіння біомаси з використанням математичної моделі запропонованої в попередніх роботах [1]. На підставі проведених досліджень можна зробити висновок про справедливість положень покладених в основу розробленої математичної моделі. Результати роботи можуть бути використані при модернізації та оптимізації процесів в аеродинамічних сушарках.

ЛІТЕРАТУРА

1. Снежкин Ю.Ф., Коринчук Д.Н. Моделирование высокотемпературной сушки торфа и биомассы в тех-нологиях производства биотоплив // Наукові праці ОНАХТ. – 2017. – Т. 81, №. 1.– С.125 –130.

2. *Коринчук Д.Н.* Модель высокотемпературной сушки торфяных частиц и ее экспериментальное подтверждение //СЭТТ-2005, М.: МЭИ. – 2005. – Т. 2. – С. 225-229.

3. *Ильясов У.Р., Игошин Д.Е.* Математическое моделирование сушки влажного пористого материала в диффузионном приближении //Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15, №. 4. – С. 689-697.

4. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача: Учебник для вузов.– 4-е изд., перераб. и доп //М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

5. *Зайдель А.Н.* Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука, 1968. – 88 с.

6. *Кравченко Н.С., Ревинская О.Г.* Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011.– 86 с.

EFFECTIVE COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY OF BIOFUEL IN THE CONDITIONS OF HIGH-TEMPERATURE DRYING

Korinchuk D.M.

Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine

Reference 6, figure 4, tabl. 1.

Key words: biomass, wood, kinetics of drying, mathematical model, planar particle, effective coefficient of thermal conductivity

The modeling of high-temperature drying of biomass and peat will allow developing and substantiating the methods of intensification of the drying process, developing engineering methods for calculating the equipment and ensuring the creation of the most rational designs of drying plants.

Increasing the accuracy of mathematical modeling requires conducting experimental studies and determining the value of the effective coefficient of thermal conductivity of materials in the dry zone, as well as the influence of the temperature regime and properties of biomass on its value.

The aim of the work is to determine the effective coefficient of heat conductivity of biomass in conditions of high temperature drying in biofuel production technologies.

The methodology of determination of the effective coefficient of thermal conductivity for use in calculations of drying process under the model of high temperature drying of biomass is developed. The article presents the results of an experimental study of the kinetics of high-temperature drying of biomass samples of pine, willow and poplar of flat form. The theoretical model of flat particle drying was developed and calculations of the process of high-temperature drying of flat bodies were conducted. According to the results of the research, the value of the effective coefficient of thermal conductivity for a series of experiments is determined by the method of minimizing the relative error of theoretical and experimental results. The average value of the effective coefficient of thermal conductivity is calculated and its applicability in the calculations of high temperature drying of biomass using the mathematical model is substantiated. Based on these studies, the validity of the provisions of the developed mathematical model is concluded. The results can be used to upgrade and optimize processes in aerodynamic dryers.

1. *Snezhkin Yu.F., Korinchuk D.N.* Modelirovaniye vysokotemperaturnoy sushki torfa i biomassy v tekhnologiyakh proizvodstva biotopliv [Modeling of high-temperature drying of peat and biomass in biofuel production technologies], *Naukovi pratsi ONAKHT [Scientific Works]*, 2017. V. 81, №. 1. P.125 -130. (Rus.)

2. *Korinchuk D.N.* Model Vysokotemperaturnoy sushki torfyanykh chastits i yeye eksperimentalnoye podtverzhdeniye [Model of high-temperature drying of peat particles and its experimental confirmation], *SETT-2005*, 2005. V. 2. P. 225-229. (Rus.)

3. *Iljasov U.R. and Igoshin D.E.* Matematicheskoye modelirovaniye sushki vlazhnogo poristogo materiala v diffuzionnom priblizhenii [Mathematical Simulation of the Process of Drying of the Wet Material in Diffusive Approximation]. *Teplofizika i aeromehanika [Thermophysics and Aeromechanics]*, 2008 Vol. 15, № 4. P. 689-697. (Rus.)

4. *Isachenko V. P., Osipova V. A. and Sukomel A. S.* *Teploperedacha [Heat Transfer]*, Moscow, Energy, 1981. 416 p. (Rus.)

5. *Zaydel A. N.* *Elementarnyye otsenki oshibok izmereniy [Simple estimates of measurement errors]*. Academy of Sciences of the USSR, Leningrad, Nauka Publ., 1968. 96 p/ (Rus.)

6. *Kravchenko N.S. and Revinskaya O.G.* *Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy i otsenki pogreshnostey v uchebnom laboratornom praktikume: uchebnoye posobiye [Methods of processing the results of measurements and estimating errors in the educational laboratory work: textbook]*, Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University], 2011. 86 p.

Отримано 21.05.18

Received 21.05.18