

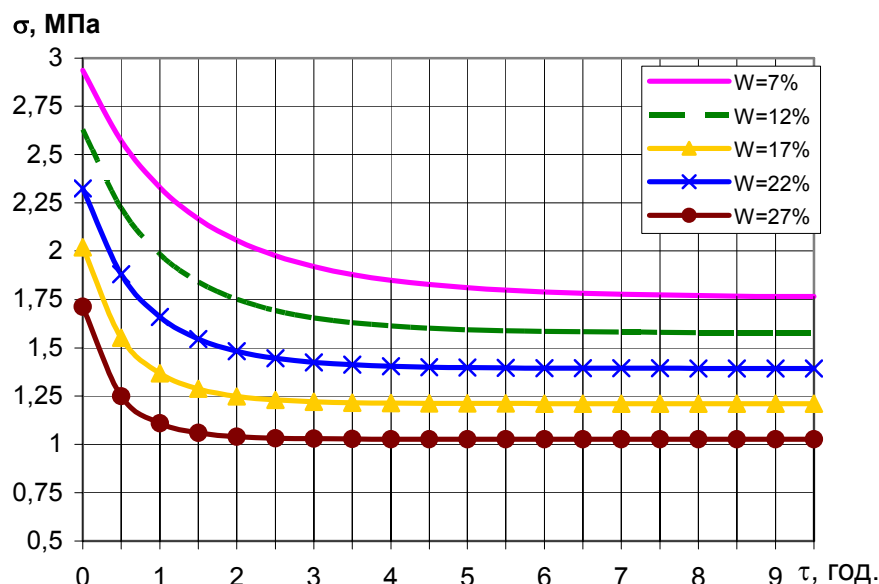


Рис. 1. Розрахункові криві довгочасного опору деревини сосни температурою $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та вологістю W , випробовуваної на розтяг у тангентальному напрямі деформування

Література

1. **Поберейко Б.П.** Аналіз критеріїв міцності деревини та анізотропних капілярно-пористих матеріалів// Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2005, вип. 15.3 – С. 138-148.
2. **Леонтьев Н.Л.** Длительное сопротивление древесины. – М.: Гослесбумиздат, 1957. – 132 с.
3. **Хухрянский П.Н.** Прочность древесины. – М.: Гослесбумиздат, 1955. – 152 с.
4. **Белянкин Ф.П., Яценко В.Ф.** Деформативность и сопротивляемость древесины как упруго-вязко-пластического тела. – К.: Изд-во АН УССР, 1957.
5. **Соколовський Я.І., Поберейко Б.П.** Дослідження граничного напружено-деформівного стану деревини у процесі сушіння// Доповіді НАН України, сер. Механіка, 2006. Подано у друк.
6. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теоретическая физика. В 10-ти т, т.VII. Теория упругости: Учеб. пособие.– 4-е изд. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
7. **Поберейко Б.П.** Розробка термодинамічного критерію міцності деревини// Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2005, вип. 15.4. – С. 186-193.
8. **Поберейко Б.П.** Ідентифікація напружено-деформівного стану деревини із змінним вологовмістом. – Дис.... канд. тех. наук: 05.05.07 – Машини та процеси лісівничого комплексу.
9. **Бленд Д.** Теория линейной вязкоупругости (перевод с англ.). – М.: Мир, 1965. – 156 с.
10. **Поберейко Б.П.** Визначення короточасної деревини// Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2006, вип. 16.2 – С. 73-77.

УДК 66.047

Проф. Я.М. Ханик, д-р техн. наук; інж. О.В. Станіславчук, канд. техн. наук; доц. В.П. Дулеба – НУ "Львівська політехніка"

КІНЕТИКА КОНВЕКТИВНОГО ТА КОНВЕКТИВНО-КОНДУКТИВНОГО СУШІННЯ МЕТАТИТАНОВОЇ КИСЛОТИ (МТК)

Наводяться результати розрахунків кінетики конвективного та конвективно-кондуктивного сушіння МТК, а саме: визначення показників степенів критерію подібності та коефіцієнта пропорційності у критеріальному рівнянні для розрахунку коефіцієнта масовіддачі у першому періоді, швидкості сушіння, тривалості першого та другого періоду, а також часу сушіння загалом.

*Prof. Ya.M. Khanyk; eng. O.V. Stanislavchuk;
doc. V.P. Duleba – NU "L'vivs'ka Politekhnik"*

Convective and convective-contact kinetic of drying the metatitanium acid

In entry presentation the result consideration of kinetic the convective and convective-contact drying metatitanium acid in the first and second period: determination of proportionate coefficient and position a Ma power of similarity criterion in the criterion Ma equation for consideration of the massdevotion coefficient and speed of drying in the first period, durability of the first and second period and the time of drying on the whole.

Постановка питання. Хімічна промисловість належить до найбільш енергомістких галузей промисловості України, яка споживає понад 8 % усіх паливно-енергетичних ресурсів країни, призначених для виробничо-експлуатаційних потреб. Природний газ серед інших енергоносіїв має основну питому вагу у вартості хімічної продукції, структурна частка якого в галузевому енергоспоживанні є більшою ніж 50 %. Енергетична частка у собівартості більшості видів продукції становить від 40 до 85 %. Відповідно, достатньо високою є енергомісткість галузевого товарного виробництва, яка визначає цінову конкурентоспроможність галузевої продукції.

Для створення сучасного високоефективного хімічного комплексу на основах енергозбереження, конкурентоспроможності і екологічної безпеки розроблено "Заходи щодо реалізації "Концепції розвитку хімічної промисловості України до 2010 року"", де основна увага надається тим виробництвам, що визначають рівень енергоспоживання всього хімічного комплексу, до яких належить виробництво діоксиду титану [1].

Аналіз останніх джерел літератури. Метатитанова кислота є проміжним продуктом у виробництві такого необхідного для багатьох галузей виробництва продукту як пігментний діоксид титану. Висока термостійкість, дисперсність і хімічна інертність цього матеріалу забезпечили його широке використання у лакофарбовій промисловості, а також у виробництві пластичних мас, лінолеуму і штучного волокна, перлону і віскозного шовку, найвищих сортів білого паперу, гумових виробів, пудри, кремів та інших косметичних продуктів [2].

Однак виробництво цього продукту є дуже енергомістким, особливо на стадії розкладу МТК до діоксиду титану в обертовій печі за температури 930 °С, в яку пастоподібна дуже різнодисперсна МТК подається з барабанного вакуум-фільтру з вологістю 55-60 % і перебуває там до 14 годин [2]. Як теплоносії використовують природний газ, витрата якого становить 180 000 м³/год (за даними ЗАТ "Кримський ТИТАН"). Тобто значна частина теплової енергії використовується на випаровування води, а не на здійснення розкладу МТК. Тому збільшення продуктивності печі за рахунок ефективного її використання є важливою задачею, яку можна вирішити включенням у технологічну схему виробництва стадії сушіння МТК перед стадією її розкладу, з використанням як теплоносія вторинних енергоресурсів.

Аналіз літературних джерел показав, що процес сушіння такого пастоподібного продукту, як МТК до цього часу не досліджувався. На деяких виробництвах проводяться спроби підсушування МТК на стрічкових сушарках, під час яких виникає багато проблем, пов'язаних із відсутністю наукових досліджень у цьому напрямку.

Результати досліджень. Нами проведено дослідження кінетики конвективного і конвективно-кондуктивного сушіння пастоподібної МТК за змінної висоти шару матеріалу, температури і швидкості теплоносія. На рис. 1-3 наведено графічні залежності кінетичних кривих конвективного сушіння МТК, які характерні наявністю першого та другого періодів сушіння.

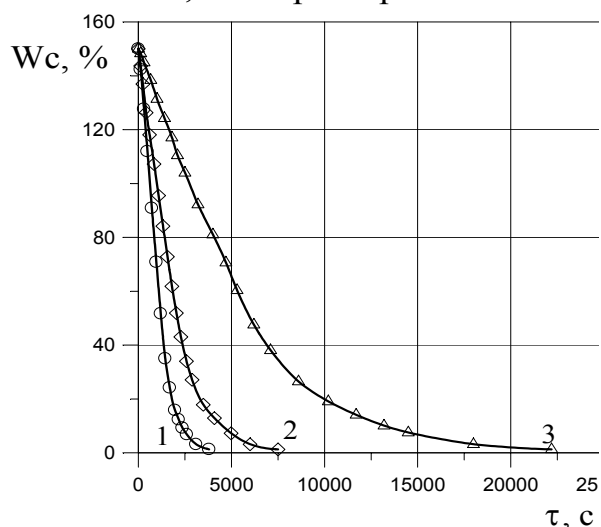


Рис. 1. Кінетика конвективного сушіння МТК за температури теплоносія 100 °С, швидкості 4,2 м/с і змінної висоти шару матеріалу: 1 – $2 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $5 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $8 \cdot 10^{-3}$ м

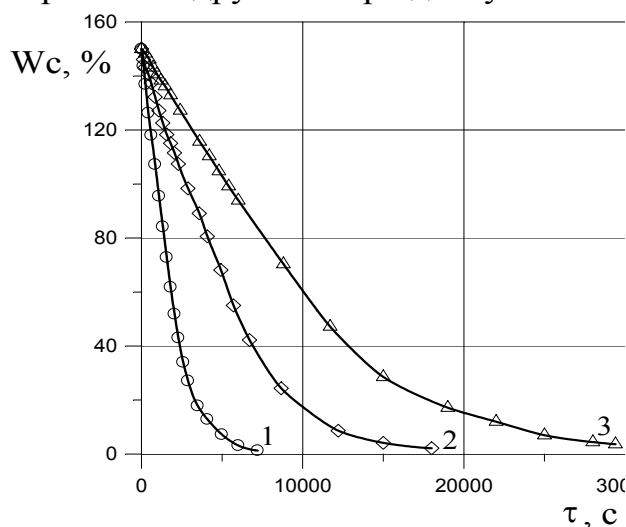


Рис. 2. Кінетика конвективного сушіння МТК за температури теплоносія 100 °С, висоти шару матеріалу $5 \cdot 10^{-3}$ м і змінної швидкості теплоносія: 1 – 4,2 м/с; 2 – 3,6 м/с; 3 – 2,4 м/с

Під час дослідження встановлено, що зростання висоти шару від $2 \cdot 10^{-3}$ м до $8 \cdot 10^{-3}$ м (у 4 рази) спричиняє збільшення тривалості сушіння від 3800 с до 22200 с (у 5,84 раза) (рис. 1). У разі зменшення швидкості теплоносія від 4,2 м/с до 2,4 м/с (у 1,75 раза) тривалість процесу зростає 7200 с до 29400 с (у 4,1 раза) (рис. 2). Із збільшенням температури теплоносія від 60 °С до 100 °С (у 1,67 раза) час сушіння зменшується від 19900 с до 7200 с (у 2,76 раза) (рис. 3).

Для узагальнення першого періоду сушіння нами використано критеріальну залежність, яка отримана з диференціального рівняння конвективного тепломасообміну [3, 4]:

$$Nu' = f(Re; Pr'; Gu; Gr; Ho; \Gamma_1; \Gamma_2; \Gamma_3; \dots), \quad (1)$$

де: Nu' – дифузійний критерій подібності Нусельта; Re – критерій подібності Рейнольдса; Pr' – дифузійний критерій подібності Прандтля; Gu – критерій подібності Гухмана; Gr – критерій подібності Грасгофа; Ho – критерій гомохронності; $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ – геометричні симплекси.

Враховуючи те, що маємо справу з процесом, на який не впливають сили тяжіння і нестационарність протікання, визначальний критерій Nu' залежить загалом від критеріїв Re, Pr', Gu та геометричних симплексів і в розгорнутому вигляді вираз (1) можна записати:

$$\frac{\beta \cdot \ell}{D} = A \cdot \left(\frac{\omega \cdot \ell \cdot \rho}{\mu} \right)^m \cdot \left(\frac{\mu}{\rho \cdot D} \right)^n \cdot \left(\frac{T_c - T_m}{T_c} \right)^k \cdot \left(\frac{\ell}{h} \right)^s, \quad (2)$$

де: β – коефіцієнт масовіддачі, м/с; ℓ – довжина шару матеріалу, м; D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$; A – коефіцієнт пропорційності; ω – швидкість теплоносія,

м/с; ρ – густина теплоносія, кг/м³; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості теплоносія, Па·с; T_c – температура середовища, °К; T_m – температура мокрого термометра, °К; h – висота шару матеріалу, м; m, n, k, s – показники степенів критеріїв подібності.

Експериментальні значення критерію Nu' нами отримано за залежністю [3]

$$Nu' = \frac{\beta \cdot \ell}{D} = \frac{J}{\frac{D}{\ell} \cdot (p_n - p_c)}, \quad (3)$$

де: J – інтенсивність процесу випаровування з поверхні матеріалу, кг/(м²·с); $(p_n - p_c)$ – різниця парціальних тисків, Н/м².

Використовуючи загальну форму критеріального рівняння (2) і одержані значення Нусельта Nu' , за рівнянням (3) нами отримано конкретну критеріальну залежність для конвективного сушіння МТК

$$Nu' = 2,399 \cdot 10^{-21} \cdot Re^{3,945} \cdot Pr^{3,313} \cdot Gu^{-0,218} \cdot \left(\frac{\ell}{h}\right)^{0,32}, \quad (4)$$

яке дає змогу розрахувати коефіцієнт масовіддачі, а відтак швидкість сушіння у першому періоді до досягнення критичної вологості, що приблизно дорівнює (залежно від температури) $W_{кр} = 35,99 - 47,09$ % з достатньою точністю для інженерних розрахунків. Зіставлення розрахункових та експериментальних значень коефіцієнта масовіддачі β показано на рис. 4, відносна похибка не перевищує 16 %.

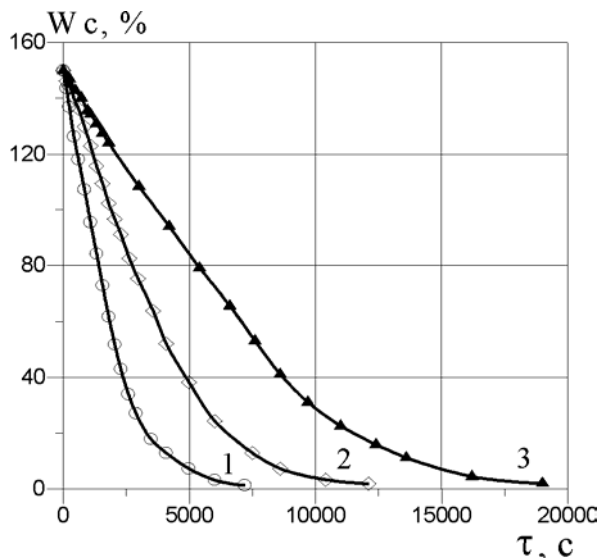


Рис. 3. Кінетика конвективного сушіння МТК за висоти шару матеріалу $5 \cdot 10^{-3}$ м, швидкості теплоносія 4,2 м/с і змінної температури теплоносія:
1 – 100 °С; 2 – 80 °С; 3 – 60 °С

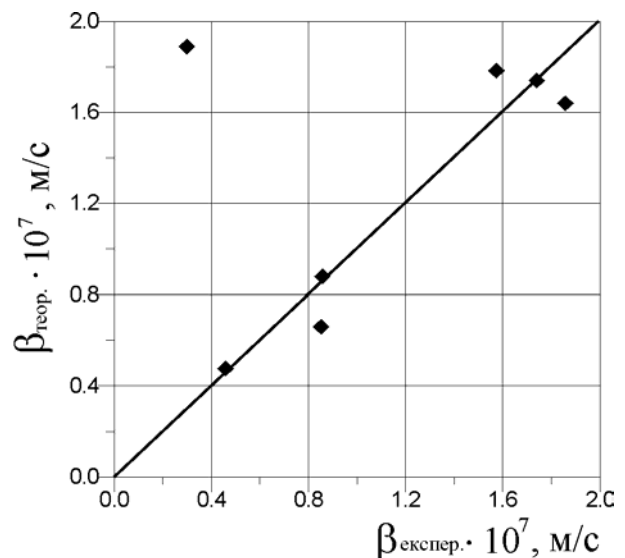


Рис. 4. Зіставлення розрахункових та експериментальних значень β

На рис. 4 спостерігається відхилення однієї точки від прямої, що відповідає сушінню за швидкості теплоносія 2,4 м/с ($Re = 14313$). Це пояснюється тим, що критеріальне рівняння (2), яке було прийнято за основу, є дійсним для значень критерію Рейнольдса, що не є меншими за 18000 [4].

Характеристикою кінетики першого періоду сушіння є швидкість сушіння N , яка визначається як тангенс кута нахилу прямої ділянки кінетичних кривих (рис. 1-3), що відповідає першому періоду сушіння. Отримані значення N підтверджують залежність швидкості сушіння від параметрів процесу та шару матеріалу, а також спостерігається певна залежність N від тривалості першого періоду $\tau_{кр}$, яку показано на рис. 5 і яка описується рівнянням:

$$\tau_{кр} = -0,815 \sqrt{\frac{N}{15,6958}}. \quad (5)$$

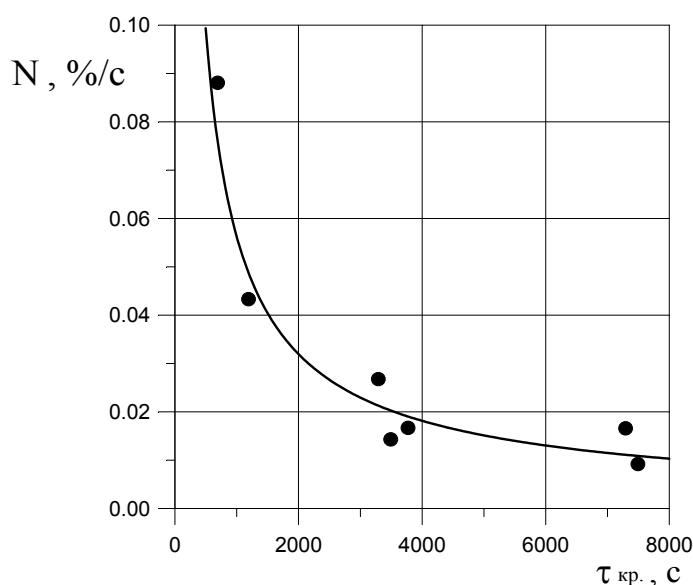


Рис. 5. Залежність швидкості сушіння N у першому періоді від $\tau_{кр}$

Визначення критичної вологості та часу сушіння у першому періоді здійснювали графоаналітичним методом, запропонованим А.В. Ликовим [3]. У результаті узагальнень також визначено коефіцієнти сушіння K та відносний коефіцієнт сушіння χ і встановлено залежність критичної вологості від температури теплоносія. На основі отриманих результатів рівняння для кількісного розрахунку кінетики конвективного сушіння МТК у другому періоді матиме вигляд:

$$\frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = e^{-0,0158 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{кр})}, \quad (6)$$

де: W – змінна вологість матеріалу, %; W_p – рівноважна вологість, %; $W_{кр}$ – наведена критична вологість, %; K – коефіцієнт сушіння, с^{-1} ; χ – відносний коефіцієнт сушіння, $1/\%$; $\tau_{кр}$ – тривалість сушіння у першому періоді, с; τ – змінний час сушіння, с.

Використовуючи рівняння (5) і (6) запишемо вираз для визначення тривалості конвективного сушіння МТК загалом:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = -0,815 \sqrt{\frac{N}{15,6958}} + \left[-\frac{1}{0,0158 \cdot N} \cdot \ln \frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} \right], \quad (7)$$

де τ_1 і τ_2 – відповідно тривалість першого і другого періодів сушіння, с.

На рис. 6-8 наведено кінетичні криві, отримані в результаті досліджень кінетики конвективно-кондуктивного сушіння МТК за змінної висоти

шару матеріалу (рис. 6), змінної швидкості теплоносія (рис. 7) та змінної температури (рис. 8).

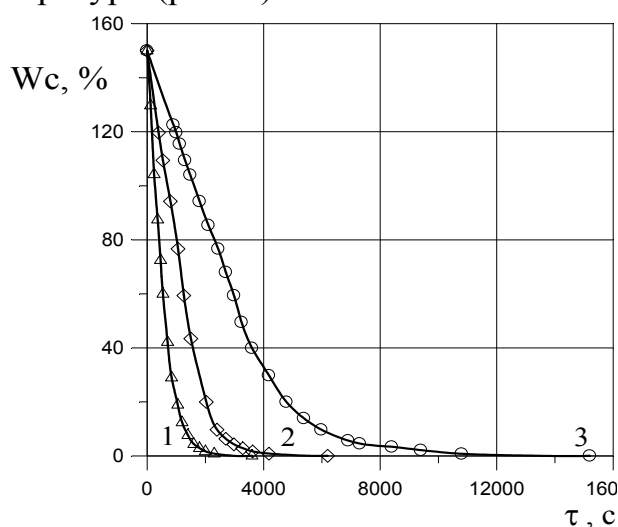


Рис. 6. Кінетика конвективно-кондуктивного сушіння МТК за температури теплоносія 100 °С, швидкості 4,2 м/с і змінної висоти шару матеріалу:
1 — 2·10⁻³ м; 2 — 5·10⁻³ м; 3 — 8·10⁻³ м

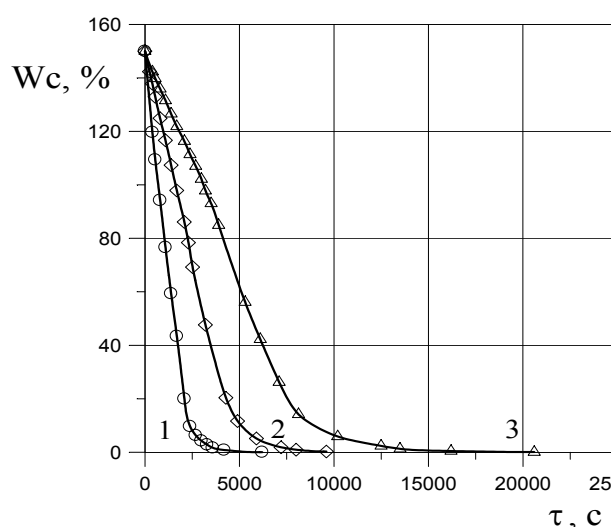


Рис. 7. Кінетика конвективно-кондуктивного сушіння МТК за температури теплоносія 100 °С, висоти шару матеріалу 5·10⁻³ м і змінної швидкості теплоносія:
1 — 4,2 м/с; 2 — 3,6 м/с; 3 — 2,4 м/с

Під час дослідження встановлено, що зростання висоти шару від 2·10⁻³ м до 8·10⁻³ м (у 4 рази) спричиняє збільшення тривалості сушіння від 3600 с до 15200 с (у 4,22 рази) (рис. 6). У разі зменшення швидкості теплоносія від 4,2 м/с до 2,4 м/с (у 1,75 рази) тривалість процесу зростає 6200 с до 20600 с (у 3,32 рази) (рис. 7). Із збільшенням температури теплоносія від 60 °С до 100 °С (у 1,67 рази) час сушіння зменшується від 10700 с до 3600 с (у 2,97 рази) (рис. 8).

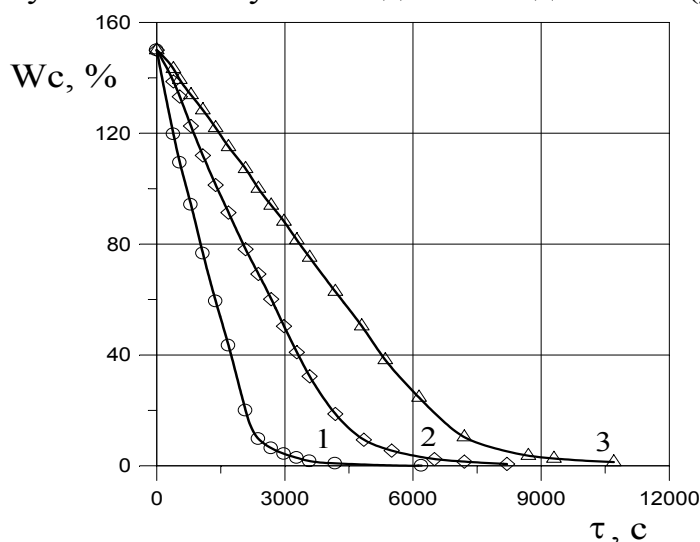


Рис. 8. Кінетика конвективно-кондуктивного сушіння МТК за висоти шару матеріалу 5·10⁻³ м, швидкості теплоносія 4,2 м/с і змінної температури теплоносія:
1 — 100 °С;
2 — 80 °С;
3 — 60 °С

Використовуючи загальну форму критеріального рівняння (2) і одержані за рівнянням (3) значення Нуссельта, нами розраховано коефіцієнт A і показники степенів критеріїв подібності та отримано конкретну критеріальну залежність:

$$Nu' = 1,41 \cdot 10^{-18} \cdot Re^{3,977} \cdot Pr^{3,5} \cdot Gu^{1,795} \cdot \left(\frac{\ell}{h} \right)^{0,087}, \quad (8)$$

яке дає змогу розрахувати коефіцієнт масовіддачі, а відтак швидкість сушіння у першому періоді до досягнення критичної вологості $W_{кр} = 36,51 \dots 44,84 \%$ (залежно від температури). Відносна похибка зіставлення розрахункових та експериментальних значень коефіцієнту масовіддачі β не перевищує 16 %.

Отримані значення швидкості конвективно-кондуктивного сушіння N , методом, описаним вище, підтверджують залежність швидкості сушіння від параметрів процесу та геометричних параметрів шару матеріалу. Залежність N від $\tau_{кр}$ аналогічна до показаної на рис. 5 і описується рівнянням:

$$\tau_{кр} = -0,579 \sqrt{\frac{N}{3,11041}}. \quad (9)$$

У результаті узагальнень визначено коефіцієнт сушіння K , критичну вологість $W_{кр}$ та відносний коефіцієнт сушіння χ . На основі здійснених узагальнень запишемо рівняння для кількісного розрахунку кінетики конвективно-кондуктивного сушіння МТК у другому періоді:

$$\frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = e^{-0,0238 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{кр})}. \quad (10)$$

На основі рівнянь (9) і (10) запишемо вираз для визначення тривалості сушіння МТК конвективно-кондуктивним методом:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = -0,579 \sqrt{\frac{N}{3,11041}} + \left[-\frac{1}{0,0238 \cdot N} \cdot \ln \frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} \right]. \quad (7)$$

На рис. 9. наведено порівняння кінетичних кривих сушіння МТК конвективним і конвективно-кондуктивним методами за змінної висоти шару матеріалу. Різниця між кривими 1 і 2 за $h = 2 \cdot 10^{-3}$ м є меншою ніж між кривими 3 і 4 за $h = 8 \cdot 10^{-3}$ м), тобто, із збільшенням висоти шару різниця між кривими сушіння зростає.

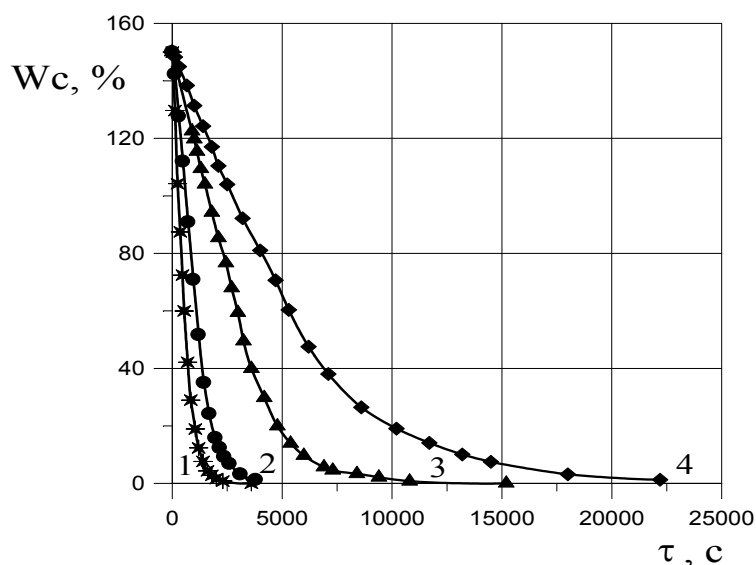


Рис. 9. Порівняння кінетичних кривих конвективного (криві 2 і 4) та конвективно-кондуктивного (криві 1 і 3) сушіння МТК за температури 100 °С, швидкості теплоносія 4,2 м/с та змінної висоти шару матеріалу: 1, 2 – $2 \cdot 10^{-3}$ м; 3, 4 – $8 \cdot 10^{-3}$ м

Порівняння кінетичних кривих, отриманих у результаті сушіння цими методами за змінних швидкості та температури теплоносія є ідентичним до наведеного на рис. 9.

На основі результатів досліджень та узагальнень кінетики двох методів сушіння МТК можна зробити висновок про те, що конвективно-кондуктивний метод для такого пастоподібного матеріалу є ефективнішим. Чим більша висота шару матеріалу (рис. 9), менша температура і швидкість теплоносія, тим це помітніше. Розраховані нами кінетичні показники дають можливість прогнозувати процес конвективного та конвективно-кондуктивного сушіння МТК, визначити більш придатний метод для сушіння цього пастоподібного матеріалу, оптимальні режими здійснення процесу, на основі чого зменшити енергомісткість та собівартість готового продукту.

Література

1. А.П. Филонов. Мероприятия по реализации "Концепции развития химической промышленности Украины" // Хімічна промисловість України: Наук.-виробн. журнал, 2002, № 1. – С. 3-6.
2. Хазин Л.Г. Двухокись титана. Изд. 2-е, пер. доп. – М.: Изд-во "Химия", 1970. – 176 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
4. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

УДК 674.05.055

*Проф. В.В. Шостак, д-р техн. наук;
магістрант Р.Р. Климаш – НЛТУ України*

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ЩОДО ВПЛИВУ МІСЦЯ РОЗМІЩЕННЯ ВЕНТИЛЯТОРА В МЕРЕЖІ НА ЙОГО АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Поставлено питання щодо можливості існування оптимального розміщення вентилятора в мережі. Описано експериментальну установку для дослідження аеродинамічних характеристик вентилятора, а також дослідження його місця розміщення. За результатами експериментів побудовано характеристику дросель-клапана та аеродинамічна характеристику вентилятора.

Prof. V.V. Shostak; master R.R. Klymash – NUFWT of Ukraine

Raising of task about research of influencing of place of placing of ventilator in a network on his aerodynamic descriptions

A question is put on relation to possibility of existence of the optimum placing of ventilator in a network. The experimental setting is described for research of aerodynamic descriptions of ventilator, and also research of his place of placing. Built description of throttle-valve and aerodynamic of ventilator by experimental results.

У деревообробній, льонопереробній, цементній, текстильній галузях промисловості широко розповсюджені аспіраційні повітроочисні системи (АПС), що відзначаються простотою конструкції, надійністю в роботі та іншими позитивними якостями. Проте переваги цих систем знецінюються таким основним недоліком, як великі енергозатрати на аспірацію і очищення повітря. На сьогодні склалася ситуація, коли на аспірацію повітря від обладнання використовується до 50 % загальної кількості електроенергії, що споживається підприємством [1]. У роботі [2], а також в інших джерелах [3, 4]