

УДК 633.1: 631.536.24

GENERALIZATION OF THE KINETICS OF THE FIRST STAGE OF FILTRATION DEHYDRATION OF FRESHLY PEELED PUMPKIN SEEDS WITH VIBRO-PNEUMATIC ACTIVATION

O. Tsurkan, A. Gerasimov, Y. Poljevoda

Vinnitsia National Agrarian University

T. Rimar

Lviv Polytechnic National University

O. Stanislavchuk

Lviv State University of Life Safety

Key words:

*Filtration dehydration
Kinetics
Pumpkin seeds
Vibrations*

Article history:

Received 24.12.2014

Received in revised form

13.01.2015

Accepted 07.02.2014

Corresponding author:

O. Tsurkan

Email:

rector@vsau.org

ABSTRACT

The dependence of critical time and speed of filtration dehydration of highlymoist freshpeeled pumpkin seeds (FPPS) on the basic parameters of the process in the first stage of drying is shown in the article. The dominant influence of pressure drop and the ratio of vertical and horizontal components of the amplitude of vibration on dehydration intensity is demonstrated. A comparison of calculated and experimental values is presented.

УЗАГАЛЬНЕННЯ КІНЕТИКИ 1-ГО ПЕРІОДУ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ СВІЖООЧИЩЕНОГО НАСІННЯ ГАРБУЗА З ВІБРАЦІЙНО-ПНЕВМАТИЧНОЮ АКТИВАЦІЄЮ

О.В. Цуркан, О.О. Герасимов, Ю.А. Полєвода

Вінницький національний аграрний університет

Т.І. Римар

Національний університет «Львівська політехніка»

О.В. Станіславчук

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

У статті наведено залежність критичного часу та швидкості фільтраційного зневоднення високовологого свіжоочищеного насіння гарбуза (СОНГ) у першому періоді сушіння від основних параметрів процесу. Обґрунтовано домінуючий вплив перепаду тисків і переважно вертикальних коливань на інтенсивність зневоднення. Проведено зіставлення розрахункових та експериментальних значень.

Ключові слова: фільтраційне зневоднення, кінетика, насіння гарбуза, вібрації.

Постановка проблеми. Враховуючи харчову та лікувальну цінність гарбузового насіння і позитивні економічні показники його виробництва, намітився стійкий ріст попиту як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках, що вимагає збільшення виробництва якісного насіння. Зважаючи на це, вирішення проблеми високоефективного конкурентоспроможного виробництва посівного та харчового насіння гарбузів є актуальним завданням і потребує створення науково обгрунтованої концепції організації інтенсивного енергоощадного процесу зневоднення як найбільш енергоємної та затратної стадії виробництва, що вимагає пошуку нових рушійних та інтенсифікаційних факторів, зокрема застосування гідродинамічних (фільтраційних) і вібраційних ефектів.

Конвективне сушіння насиченого незв'язаною вологою шару СОНГ, схильного до злипання, налипання й утворення кірки, в нерухомому шарі, за аналогією із сушінням насіння злакових культур, яке знаходить застосування у значній кількості сільгоспвиробників [1, 2] погіршує кінцеві якісні показники насіння, робить процес невиправдано тривалим, а через значне подорожчання енергоносіїв особливо енергозатратним, що впливає на собівартість продукції і зменшує її конкурентоспроможність. Інтенсифікація процесу сушіння шляхом підвищення температури сушильного агента лімітується гранично допустимими температурою нагріву та швидкістю зневоднення [3, 4], перевищення яких призводять до втрати посівних і харчових якостей насіння як термолабільного матеріалу.

Застосування вібраційних технологій у процесах сушіння високовологих насінневих матеріалів, до яких висуваються вимоги збереження посівних якостей і врахування суттєвих змін їх властивостей зі зміною вологості, стримуються необхідністю теоретичних та експериментальних напрацювань, що дозволяють визначити закономірності комплексного впливу вібраційних, гідродинамічних і теплових факторів та на їх основі визначення раціональних робочих параметрів процесів і конструктивних параметрів сушильного обладнання.

Аналіз останніх досліджень. За результатами досліджень фільтраційного сушіння матеріалів різної природи та структури [5, 6, 7] і вивчення механізму сушіння створені математичні моделі процесу зневоднення та спроектовані відповідні сушильні агрегати. Також одержані позитивні ефекти від використання цього методу сушіння для досліджуваних матеріалів. З наукової точки зору актуальними є дослідження кінетики зневоднення високовологих термолабільних матеріалів, зокрема СОНГ, методом фільтрації теплоносія через шар матеріалу під дією перепаду тиску у напрямку поверхня матеріалу — перфорована перегородка.

Проведені дослідження гідродинаміки процесу [8] дозволили встановити залежність гідродинамічного опору від основних факторів: сушильного агента (швидкості руху, густини потоку, динамічної в'язкості теплоносія), шару матеріалу (еквівалентного діаметра МНК, висоти та неоднорідність шару), матеріалу (розміру та фактору форми насінини СОНГ), зовнішніх факторів впливу на стан шару СОНГ (віброприскорення та частоти обертів перемішувача).

З урахуванням питомої енергоємності та продуктивності визначено раціональні значення основних параметрів процесу [8]: температуру сушильного

агента $t_{\text{cal}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; коефіцієнт заповнення об'єму сушильної камери $K_3 = 0,75$; частота обертів перемішувача-очищувача $n = 1,2 \text{ об/хв}$; віброприскорення $A\omega^2 = 55 \text{ м/с}^2$ та визначено раціональне значення перепаду тиску над і під шаром СОНГ $\Delta p = 1250 \text{ Па}$.

Мета дослідження. Дослідження процесу фільтраційного зневоднення СОНГ та обґрунтування доцільності вібраційної активації як вагомого інтенсифікуючого чинника на основі отриманих математичних залежностей, підтвердження адекватності запропонованих моделей порівнянням аналітичних та експериментальних результатів досліджень.

Виклад основного матеріалу. У загальному процес фільтраційного зневоднення СОНГ, з урахуванням кута нахилу кривих залежностей (рис. 1), можна розділити на два умовних періоди.

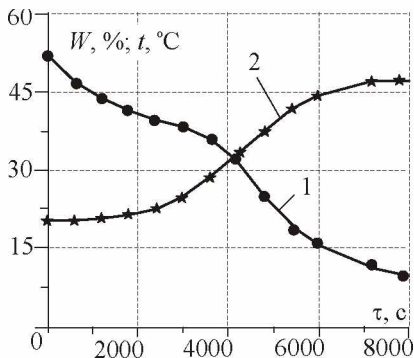


Рис. 1. Зміна вологості СОНГ (крива 1) і температури шару насіння (крива 2) від тривалості фільтраційно-конвективного зневоднення в інтервалі вологості насіння 38—52 % за умов: $K_3 = 0,75$; $t_{\text{cal}} = 30^\circ\text{C}$; $\Delta p = 1250 \text{ Па}$; $n = 1,2 \text{ об/хв}$; $A\omega^2 = 55 \text{ м/с}^2$; $A_v/A_r = 2,4$

процесом випаровування. У процесі зневоднення інтенсивність механічного винесення вологи зменшується, а кількість випарованої вологи збільшується. Спільне проходження даних процесів відбувається таким чином, що протягом усього періоду сумарна кількість видаленої вологи за одиницю часу залишається практично постійною.

Для другого періоду фільтраційного зневоднення СОНГ у межах вологості 38—44 % характерна спадна швидкість сушіння, на кінетичних кривих (рис. 1) зображується криволінійними ділянками, кут нахилу яких свідчить про сповільнення процесу зневоднення.

Експериментальні дослідження проводились із застосуванням дослідно-промислового зразка вібраційної фільтраційно-конвективної сушарки [9]. На кінетику процесу фільтраційного зневоднення СОНГ впливають як мікро-, так і макрофактори [10], які повністю врахувати під час аналітичного опису процесу досить складно.

Для визначення значень критичних вологостей насіння $W_{\text{кр}}$ за різної температури сушильного агента, перепаду тисків, співвідношення верти-

У першому періоді зневоднення СОНГ в інтервалі вологості 44—52 % характерне механічне видалення вологи з наскрізних міжнасінневих каналів (МНК) — макропор шару СОНГ та попереднє незначне прогрівання насіння. Спостерігається інтенсивне видалення вільної вологи за сталої швидкості зневоднення за рахунок як гідродинамічних процесів (витіснення, зрив), так і за рахунок випаровування, тому в цьому інтервалі вологості кінетичні криві зображені прямими нахиленими лініями, кут нахилу яких залежить від швидкості проходження процесу зневоднення. На початку цієї стадії механічне винесення вологи домінує над

кальної та горизонтальної складових амплітуди вібрацій і висот шару СОНГ, а також часу сушіння у першому періоді $\tau_{кр}$ скористаємось методом, описаним А.В. Ликовим [11], який полягає в побудові кінетичних кривих у координатах $\lg(W - W_p) = f(\tau)$.

За отриманими результатами експериментальних досліджень (рис. 2, 4, 6, 8) графоаналітичним методом визначили критичну вологість та час її досягнення для змінних параметрів сушильного агента й геометричних параметрів шару матеріалу (рис. 3, 5, 7, 9).

Перший і другий періоди фільтраційного сушіння СОНГ (рис. 3, 5, 7, 9) узагальнено прямими лініями, ордината точки перетину яких відповідає критичній вологості $\lg(W_{кр})$, а абсциса — часу сушіння СОНГ у першому періоді $\tau_{кр}$. Критичну вологість $W_{кр}$ можна розрахувати за залежністю:

$$W_{кр} = 10^x + W_p, \quad (1)$$

де x — ордината точки перетину двох прямих, що відповідають першому та другому періодам фільтраційного сушіння; W_p — рівноважне значення вологості матеріалу, %.

Тривалість сушіння СОНГ у першому періоді $\tau_{кр}$ зменшується із збільшенням співвідношення вертикальної та горизонтальної складових амплітуди вібрацій (рис. 2, 3). Так, для $A_v/A_r = 2,4$ вона становить 1580 с, а для $A_v/A_r = 0$ — 2510 с, значення критичної вологості становить $W_{кр} \approx 42\%$. Тобто надання переважно вертикальних коливань днищу сушильної камери призводить до збільшення кількості винесеної вологи з МНК та поверхні СОНГ.

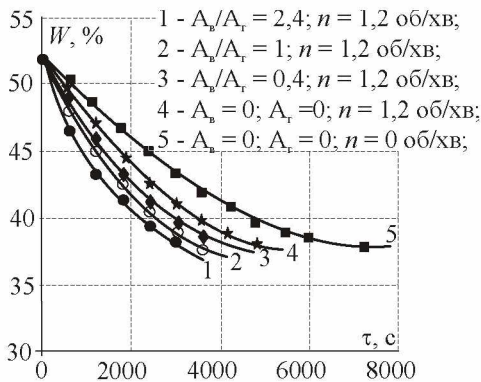


Рис. 2. Зміна вологості СОНГ від тривалості фільтраційного зневоднення за різних значень співвідношення вертикальної і горизонтальної складових амплітуд вібрацій за умов: $A\omega^2 = 55 \text{ м/с}^2$; $t_{cal} = 30^\circ\text{C}$; $K_3 = 0,75$; $\Delta p = 1250 \text{ Па}$

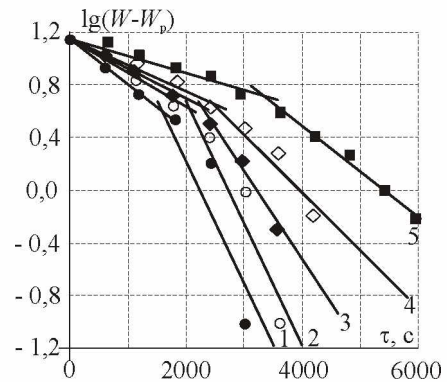


Рис. 3. Визначення критичної вологості СОНГ і часу її досягнення за фільтраційного зневоднення за різних значень співвідношення вертикальної і горизонтальної складових амплітуд вібрацій за умов: $A\omega^2 = 55 \text{ м/с}^2$; $t_{cal} = 30^\circ\text{C}$; $K_3 = 0,75$; $\Delta p = 1250 \text{ Па}$

Варто зазначити, що спостерігається вплив частоти обертання перемішувача-очищувача на значення критичної вологості матеріалу: за $n = 1,2$ об/хв —

$W_{кр} = 42,5\%$, а за $n = 0$ об/хв — $W_{кр} = 43,25\%$. Тобто спостерігається вплив зовнішніх сил перемішування на процес зневоднення СОНГ.

Збільшення температури сушильного агента (рис. 4, 5) від 20 до 50 °С (у 2,5 раза) призводить до зменшення критичного часу сушіння від 2230 до 1500 с (у 1,5 раза) і тривалості першого періоду сушіння.

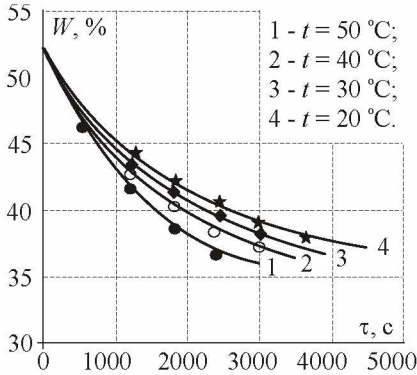


Рис. 4. Зміна вологості СОНГ від тривалості фільтраційного зневоднення за різних значень температури сушильного агента за умов: $K_3 = 0,75$; $\Delta p = 1250$ Па; $n = 1,2$ об/хв; $A\omega^2 = 55$ м/с²; $A_b/A_r = 2,4$

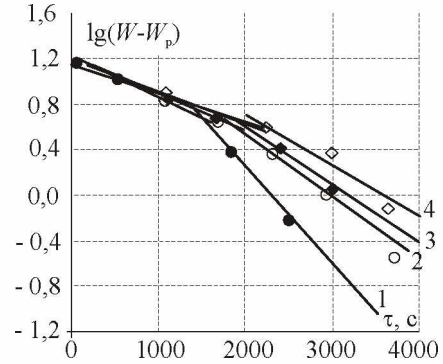


Рис. 5. Визначення критичної вологості СОНГ та часу її досягнення за фільтраційного зневоднення за різних значень температури сушильного агента за умов: $K_3 = 0,75$; $\Delta p = 1250$ Па; $n = 1,2$ об/хв; $A\omega^2 = 55$ м/с²; $A_b/A_r = 2,4$

Збільшення коефіцієнта заповнення об'єму сушильної камери в межах $K_3 = 0,25 \dots 0,75$, тобто висоти шару СОНГ від 0,008 до 0,03 м (приблизно утричі) (рис. 6, 7) за критичної вологості $W_{кр} = 41,07\%$ призводить до збільшення часу її досягнення від 1250 до 2500 с (удвічі).

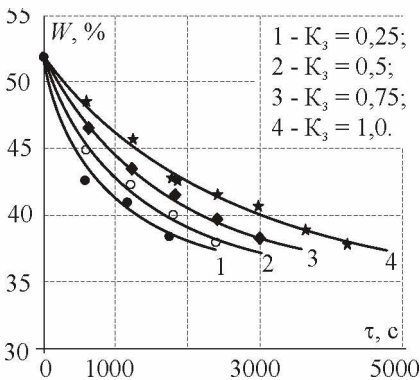


Рис. 6. Зміна вологості СОНГ від тривалості фільтраційного зневоднення за різних значень коефіцієнта заповнення K_3 сушильної камери за умов: $t_{cal} = 30^\circ\text{C}$; $\Delta p = 1250$ Па; $n = 1,2$ об/хв; $A\omega^2 = 55$ м/с²; $A_b/A_r = 2,4$

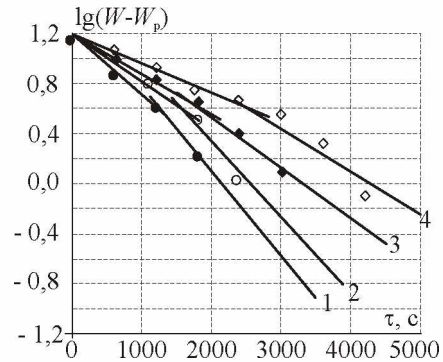


Рис. 7. Визначення критичної вологості СОНГ і часу її досягнення за фільтраційного зневоднення за різних значень коефіцієнта заповнення K_3 сушильної камери за умов: $t_{cal} = 30^\circ\text{C}$; $\Delta p = 1250$ Па; $n = 1,2$ об/хв; $A\omega^2 = 55$ м/с²; $A_b/A_r = 2,4$

Зростання перепаду тисків над і під шаром СОНГ від 750 до 1750 Па (у 2,33 раза) за критичної вологості $W_{кр} \approx 41,4\%$ призводить до зменшення часу її досягнення від 3440 до 1450 с (у 2,37 раза). Варто зазначити, що у діапазоні зміни перепаду тиску 1250—1750 Па (у 1,4 раза) сприяє зменшенню часу сушіння від 1650 до 1450 с (у 1,14 раза); а на ділянці перепаду тисків у діапазоні 750—1250 Па зростання перепаду тиску у 1,67 раза має більш інтенсивніший вплив на кінетику процесу (тривалість досягнення критичної вологості зменшується від 3440 до 1650 с (у 2,08 раза).

Швидкість сушіння у першому періоді визначається як тангенс кута нахилу кінетичних кривих, що відповідають ділянці першого періоду. Для визначення тривалості сушіння у першому періоді наведено графічну залежність критичного часу сушіння $\tau_{кр}$ від швидкості сушіння N у першому періоді (рис. 8) згідно з виразом:

$$\tau_{кр} = \tau_I = \frac{28,1}{N^{0,83}} \quad (2)$$

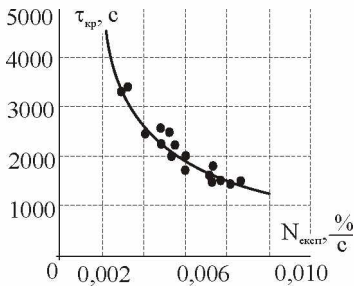


Рис. 8. Залежність швидкості сушіння (N) у першому періоді СОНГ від критичного часу фільтраційного зневоднення

Швидкість фільтраційного зневоднення СОНГ у першому періоді залежить від параметрів процесу сушіння, тобто від температури сушильного агента, висоти шару матеріалу (коефіцієнта заповнення сушильної камери K_3), перепаду тисків над і під шаром матеріалу та значень співвідношення вертикальної й горизонтальної складових амплітуди вібрацій: $N = f(t, A_B/A_T, H, \Delta p)$. Таку залежність можна представити у загальному вигляді рівнянням [12]:

$$N = A \cdot T^m \cdot \left(\frac{A_B}{A_T} \right)^n \cdot H^k \cdot \Delta p^h \quad (3)$$

Коефіцієнт A та показники степеня m, n, k, h визначені в результаті розв'язку системи з п'яти рівнянь, одержаних на основі експериментальних даних:

$$\begin{cases} N_1 = A \cdot t_1^m \cdot \left(\frac{A_B}{A_T} \right)_1^n \cdot H_1^k \cdot \Delta p_1^h \\ N_2 = A \cdot t_2^m \cdot \left(\frac{A_B}{A_T} \right)_2^n \cdot H_2^k \cdot \Delta p_2^h \\ N_3 = A \cdot t_3^m \cdot \left(\frac{A_B}{A_T} \right)_3^n \cdot H_3^k \cdot \Delta p_3^h \\ N_4 = A \cdot t_4^m \cdot \left(\frac{A_B}{A_T} \right)_4^n \cdot H_4^k \cdot \Delta p_4^h \\ N_5 = A \cdot t_5^m \cdot \left(\frac{A_B}{A_T} \right)_5^n \cdot H_5^k \cdot \Delta p_5^h \end{cases} \quad (4)$$

Логарифмуючи (4), отримаємо:

$$\begin{cases} \lg N_1 = \lg A + m \cdot \lg t_1 + n \cdot \lg \left(\frac{A_b}{A_r} \right)_1 + k \cdot \lg H_1 + h \cdot \lg \Delta p_1 \\ \lg N_2 = \lg A + m \cdot \lg t_2 + n \cdot \lg \left(\frac{A_b}{A_r} \right)_2 + k \cdot \lg H_2 + h \cdot \lg \Delta p_2 \\ \lg N_3 = \lg A + m \cdot \lg t_3 + n \cdot \lg \left(\frac{A_b}{A_r} \right)_3 + k \cdot \lg H_3 + h \cdot \lg \Delta p_3 \\ \lg N_4 = \lg A + m \cdot \lg t_4 + n \cdot \lg \left(\frac{A_b}{A_r} \right)_4 + k \cdot \lg H_4 + h \cdot \lg \Delta p_4 \\ \lg N_5 = \lg A + m \cdot \lg t_5 + n \cdot \lg \left(\frac{A_b}{A_r} \right)_5 + k \cdot \lg H_5 + h \cdot \lg \Delta p_5 \end{cases} \quad (5)$$

Підставляючи відповідні значення заданих величин у (5) і розв'язуючи систему рівнянь, отримали коефіцієнт $A = 3,9 \cdot 10^{-8}$ та показники степеня $m = 0,048$; $n = 0,22$; $k = -0,17$; $h = 1,62$, а швидкість зневоднення у першому періоді залежно від зміни параметрів процесу можна розрахувати за залежністю:

$$N = 3,9 \cdot 10^{-8} \cdot t^{0,048} \cdot \left(\frac{A_b}{A_r} \right)^{0,22} \cdot H^{-0,17} \cdot \Delta p^{1,62}. \quad (6)$$

Порівняння розрахункових (за рівнянням (6)) та експериментальних значень швидкості фільтраційного зневоднення СОНГ у першому періоді сушіння наведено на рис. 9.

Отже, із зростанням перепаду тисків над і під шаром дисперсного матеріалу, температури теплоносія та співвідношення вертикальної і горизонтальної складових амплітуди вібрацій A_b/A_r , швидкість сушіння у першому періоді зростає, а із збільшенням висоти шару матеріалу (коефіцієнта заповнення сушильної камери) зменшується, що підтверджують численні експериментальні дослідження.

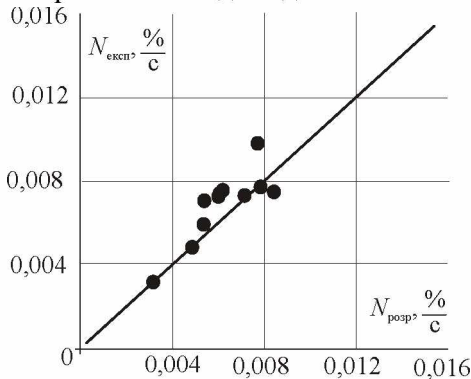


Рис. 9. Порівняння розрахункових (за рівнянням (6)) та експериментальних значень швидкості фільтраційного зневоднення СОНГ у першому періоді сушіння

Крім того, варто зазначити, що вплив перепаду тисків і відношення A_b/A_r на швидкість зневоднення СОНГ у першому періоді домінує порівняно з температурою сушильного агента. Аналізуючи рівняння (6), можна зробити висновок, що швидкість зневоднення СОНГ у першому періоді пропорційна перепаду тиску над і під шаром матеріалу у 1,64 степені ($t \sim \Delta p^{1,62}$), що у 34 рази більше, ніж вплив температури сушильного агента, яка є пропорційною швидкості зневоднення N у 0,048 степені.

Висновки

1. За отриманими результатами експериментальних досліджень графоаналітичним методом, описаним А.В. Ликовим, визначено критичну вологість і час її досягнення для змінних параметрів сушильного агента та геометричних параметрів шару матеріалу.

2. Отримано залежність швидкості фільтраційного зневоднення СОНГ у першому періоді від основних параметрів процесу, тобто від температури сушильного агента, висоти шару матеріалу (коефіцієнта заповнення сушильної камери K_3), перепаду тисків над і під шаром матеріалу та значень співвідношення вертикальної й горизонтальної складових амплітуди вібрацій.

3. Аналіз отриманих рівнянь свідчить, що вплив перепаду тисків і відношення A_B/A_T на швидкість зневоднення СОНГ у першому періоді домінують порівняно з температурою сушильного агента, зокрема швидкість зневоднення СОНГ у першому періоді пропорційна перепаду тиску над і під шаром матеріалу у 1,64 степені ($t \sim \Delta p^{1,62}$), що у 34 рази більше, ніж вплив температури сушильного агента, яка є пропорційною швидкості N у 0,048 степені.

4. На основі експериментальних даних у результаті розв'язку системи з чотирьох рівнянь визначені коефіцієнти та степеневі показники для узагальнення результатів дослідження кінетики процесу фільтраційного зневоднення СОНГ.

5. Отримані рівняння надають можливість прогнозувати процес зневоднення СОНГ, а також спроектувати сушильне обладнання відповідно до конкретних гідродинамічних і кінетичних умов процесу.

6. Зіставлення розрахункових та експериментальних значень швидкості фільтраційного зневоднення СОНГ у першому періоді сушіння підтверджує їх адекватність.

Література

1. *Лихацький В.І.* Баштаництво. Навчальний посібник / В.І. Лихацький. — К.: Вища школа, 2002. — 166 с.

2. *Голубкович А.В.* Сушка высоковлажных семян и зерна / А.В. Голубкович, А.Г. Чижигов. — М.: Росагропромиздат, 1991. — 173 с.

3. *Коненков П.Ф.* Температурные режимы сушки семян бахчевых культур / П.Ф. Коненков, К.Ж. Сейтбаев // Селекция и семеноводство. — 1990. — № 3. — С. 47—49.

4. *Голубкович А.В.* Технологические основы сушки высоковлажных семян овощных и бахчевых культур с обеспечением высокого качества: дис. на соиск. науч. степени докт. техн. наук: 05.20.01 / А.В. Голубкович. — Москва, 1989. — 234 с.

5. *Ханик Я.М., Римар Т.І., Гузьова І.О.* Сушіння дисперсних матеріалів в умовах фільтрації теплоносія // Збірник наукових праць III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Теорія і практика сучасного природознавства». — Херсон: П.П. Вишемирський, 2007. — С. 88—90.

6. *Атаманюк В.М.* Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів: дис. доктора техн. наук: 05.17.08 / Атаманюк Володимир Михайлович. — Львів, 2007. — 312 с.

7. Ханик Я.М., Станіславчук О.В., Дулеба В.П. Энергозбереження і технологічні особливості сушіння біологічно-активних продуктів // Тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми управління якістю підготовки фахівців-екологів у світлі інтеграції освіти України в європейський простір та перспективні природоохоронні технології”. — Львів. — 2003. — С. 68.

8. Цуркан О.В. Гідродинаміка процесу фільтраційного зневоднення свіжоочищеного насіння гарбуза з вібраційною активацією / О.В. Цуркан, О.О. Герасимов, Т.І. Римар, О.В. Станіславчук // Вібрації в техніці і технологіях. — 2014. — № 2 (74). — С. 147—149.

9. Патент 79839 U Україна, МПК⁵¹ F 26 B 17/00. Спосіб сушіння / Цуркан О.В., Коц І.В., Герасимов О.О., Горбатюк В.А.; заявник і патентовласник Вінницький національний аграрний університет. — № а201215176; заявл. 29.12.12; опубл. 13.05.13, Бюл. № 9.

10. Ткаченко И.М. Семена овощных и бахчевых культур. / И.М. Ткаченко, Д.А. Ткаченко. — М.: Колос, 1997. — 140 с.

11. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. — М.: Энергия, 1968. — 472 с.

12. Касаткин Л.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. / Л.Г. Касаткин. — М.: Химия, 1971. — 783 с.

ОБОБЩЕНИЕ КИНЕТИКИ 1-ГО ПЕРИОДА ФИЛЬТРАЦИОННОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ СВЕЖЕОЧИЩЕННЫХ СЕМЯН ТЫКВЫ С ВИБРАЦИОННО-ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИЕЙ

О.В. Цуркан, А.А. Герасимов, Ю.А. Полевода

Винницький національний аграрний університет

Т.И. Римар

Національний університет «Львівська політехніка»

А.В. Станіславчук

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

В статье приведена зависимость критического времени и скорости фильтрационного обезвоживания высоковлажных свежоочищенных семян тыквы (СОНГ) в первом периоде сушки от основных параметров процесса. Обосновано доминирующее влияние перепада давлений и преимущественно вертикальных колебаний на интенсивность обезвоживания. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных значений.

Ключевые слова: *фильтрационное обезвоживание, кинетика, семена тыквы, вибрации.*