

УДК 637.3

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.4.23>

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПРЕСІЙНО-ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КАЗЕЇНУ-СИРЦЮ

Кравець О. І. – кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри обладнання харчових технологій
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя
ORCID ID: 0000-0002-3309-9962
Scopus-Author ID: 57211205224

Шинкарик М. М. – кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедри обладнання харчових технологій
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя
ORCID ID: 0000-0003-3489-9803

Кравець В. І. – аспірант спеціальності «Галузеве машинобудування»
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя
ORCID ID: 0000-0003-4770-0269

Стадницький М. А. – аспірант спеціальності «Галузеве машинобудування»
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя
ORCID ID: 0009-0005-1548-4735

Складність зниження енергоємності сушіння та його інтенсифікації обумовлюється тим, що незважаючи на значне поширення даний процес є найменш дослідженим, у зв'язку із труднощами з якими зіштовхуються вчені при створенні математичної моделі одночасного перенесення теплових потоків, сухих речовин та вологи.

Перспективним напрямком підвищення ефективності процесу сушіння є збільшення площі поверхні контакту фаз (матеріалу та сушильного агента) для теплопередачі та масообміну.

Досягти збільшення поверхні контакту можна використовуючи компресійно-фільтраційне метод сушіння замість звичайних конвективних способів.

Однак компресійно-фільтраційне сушіння доцільно застосовувати лише по відношенню до матеріалів, що поєднують пористу структуру та пружні властивості. При цьому для визначення параметрів процесу сушіння важливими є компресійно-фільтраційні властивості матеріалу. До таких матеріалів зокрема відноситься казеїн.

Метою досліджень було визначення компресійно-фільтраційних властивостей казеїну для оцінки можливості практичного застосування компресійно-фільтраційного сушіння по відношенню до казеїну.

Результати досліджень компресійно-фільтраційних властивостей казеїну-сирцю свідчать, що останній володіє пружно-пластичними властивостями, які перебувають в одноступінчій залежності від значення тиску, що діє на шар казеїну.

Після припинення дії тиску на шар казеїну його висота відновлюється на 88% у порівнянні із висотою шару до деформації. Тому можна стверджувати про можливість застосування компресійно-фільтраційного сушіння по відношенню до казеїну-сирцю.

Результати дослідження пористості казеїну дозволили встановити, що об'єм сушильного агента, який буде поглинатися шаром казеїну в процесі сушіння становитиме 66% від його об'єму. Це дозволить значно збільшити площу поверхні контакту фаз у порівнянні із іншими видами сушіння.

Ключові слова: казеїн-сирець; сушіння, деформація, вологість.

Kravers O. I., Shynkaryk M. M., Kravers V. I., Stadnytskyi M. A. Research of compression and filtration properties of raw casein

The difficulty of reducing the energy intensity of drying and its intensification is due to the fact that, despite its widespread use, this process is the least researched, due to the difficulties faced by scientists when creating a mathematical model of the simultaneous transfer of heat flows, dry substances and moisture.

A promising direction for increasing the efficiency of the drying process is to increase the surface area of phase contact (material and drying agent) for heat transfer and mass exchange.

It is possible to achieve an increase in the contact surface using the compression-filtration method of drying instead of the usual convective methods.

However, compression-filtration drying should be used only in relation to materials that combine a porous structure and elastic properties. At the same time, the compression and filtration properties of the material are important for determining the parameters of the drying process. Such materials include casein in particular.

The purpose of the research was to assess the possibility of practical application of compression-filtration drying of casein.

The results of studies of the compression-filtration properties of raw casein show that the latter has elastic-plastic properties that are uniquely dependent on the value of the pressure acting on the casein layer.

After the cessation of pressure on the casein layer, its height is restored by 88% compared to the height of the layer before deformation. Therefore, it is possible to claim the possibility of using compression-filtration drying in relation to raw casein.

The results of the study of casein porosity made it possible to establish that the volume of the drying agent that will be absorbed by the casein layer during the drying process will be 66% of its volume. This will allow to significantly increase the area of the contact surface of the phases in comparison with other types of drying.

Key words: raw casein; drying, deformation, moisture.

Вступ. Сушіння у харчовій промисловості займає особливе місце – воно є одним із найбільш широко застосовуваних та складних технологічних процесів у галузі та, у той же час, одним із найбільш енергоємних.

Складність зниження енергоємності сушіння та його інтенсифікації обумовлюється тим, що незважаючи на значне поширення даний процес є найменш дослідженим, у зв'язку із труднощами із якими зіштовхуються вчені при створенні математичної моделі одночасного перенесення теплових потоків, сухих речовин та вологи [1].

Тому на даний час перед харчовою галуззю гостро стоїть завдання пошуку нових технологічних прийомів, що дозволять знизити питому енергоємність процесів сушіння.

Актуальність роботи. Враховуючи велику різноманітність способів сушіння, апаратів, а також матеріалів, які піддаються сушінню та відповідно їх властивостей, вести мову про підвищення ефективності процесу сушіння загалом немає сенсу.

Зокрема актуальними є роботи, які спрямовані на створення комбінованих способів сушіння на основі результатів досліджень закономірностей процесу та із врахуванням властивостей об'єкту сушіння.

Перспективним напрямком підвищення ефективності процесу сушіння є збільшення площі поверхні контакту фаз (матеріалу та сушильного агенту) для теплопередачі та масообміну [1-4].

Так у [5, с. 56-58] авторами даної статті пропонується новий метод сушіння, який ґрунтується на тому, що деякі харчові маси мають пористу структуру та володіють пружно-пластичними властивостями. Однак дане сушіння виправдано застосовувати лише по відношенню до матеріалів, що поєднують пористу структуру та пружні властивості. При цьому для визначення параметрів процесу сушіння важливими є компресійно-фільтраційні властивості матеріалу. Тому

для оцінки потенційної можливості застосування компресійно-фільтраційного сушіння по відношенню до казеїну-сирцю доцільно встановити відповідні властивості даного матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Компресійні та фільтраційні властивості харчової сировини досліджено досить детально, зокрема такими науковцями, як Воробйов Е.І., Шинкарик М.М. та Єресько Г.О. Так в роботі [6, с. 112-113] наведено результати дослідження компресійно-фільтраційних властивостей сирів з підпалення сирної маси. У роботі [7, с. 114-117] на основі досліджених залежностей компресійно-фільтраційних властивостей представлено математичну модель відтиску стисливих матеріалів із врахуванням швидкості руху твердої фази. А в роботі [8, с. 476-484] авторотами даної статті приведено результати досліджень відповідних властивостей білкової дисперсної фази сироватки отриманої при виробництві різних продуктів, у тому числі, отриманої при виробництві технічного казеїну.

Однак компресійно-фільтраційні властивості казеїну-сирцю, на даний час залишаються не дослідженими.

У дослідженнях компресійно-фільтраційних властивостей матеріалів у харчовій галузі використовують основні положення теорії фільтраційної консолідації, що була розроблена для механіки ґрунтів [6, с. 111]. Можливість застосування цієї теорії при визначенні компресійно-фільтраційних характеристик харчових матеріалів була доведена багатьма дослідниками [6-8].

Метою досліджень було визначення компресійно-фільтраційних властивостей казеїну для оцінки можливості практичного застосування компресійно-фільтраційного сушіння по відношенню до казеїну.

Методика досліджень. З метою дослідження компресійних та фільтраційних властивостей казеїну використовували експериментальну установку, що зображена на рисунку 1. Вона складалася з циліндра 1 із перфорованим поршнем 2 та кришкою 3, яка також слугувала направляючою для штока 4. Поверхня поршня 2 та перфороване дно 5 покриті шаром фільтрувальної тканини 6. Необхідне зусилля створювали за допомогою вантажу 7, що поміщали на пластину 8. Величину переміщення поршня фіксували індикатором 9 (точність 0,01 мм). Кількість профільтрованої рідини фіксували мірною посудиною 10 (точність 0,5 мл).

Рідина надходила з бачка 11. Трубки 12 та 13 виконували функцію гідрозатвору (патрубок 14 розміщений на рівні дна 5). Вентиль 15 служить для створення необхідного напору.

Після тарування установки між перфорованим дном та поршнем поміщали шар казеїну при температурі 20°C. Встановлювали відповідний вантаж на пластину 8 та підводили поршень до продукту. Значення деформації шару казеїну фіксували протягом 600с. Дослідження проводили у одинадцять етапів, із кожним етапом збільшуючи тиск, що діє на казеїн на 0,5 кПа (від 0 до 5,0 кПа). З бака 11 пропускали воду через затиснений між поршнем та днищем шар казеїну, та фіксували об'єм рідини, що профільтровується через шар продукту за фіксований час, для кожного значення тиску.

Після припинення деформації казеїну на останньому етапі, проводили поступове розвантаження перфорованого поршня та визначали висоту відновлення шару казеїну.

Для оцінки компресійних та фільтраційних характеристик казеїну використовували ряд параметрів, серед яких: відносна деформація шару, пористість, коефіцієнт пористості, модуль стисливості, коефіцієнт фільтрування та питомий опір

фільтруванню. Дослідили залежності даних параметрів від величини тиску, що діє на шар казеїну.

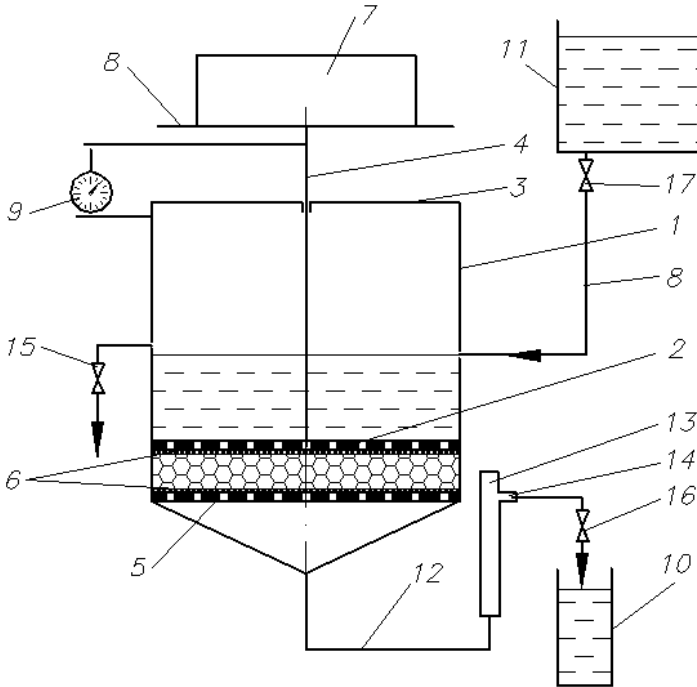


Рис. 1. Схема дослідної установки

Відносну деформацію h' визначали як відношення висоти ущільненого шару h до початкового значення висоти шару казеїну h_0 .

Під пористістю ε розуміли відношення об'єму пор в матеріалі до загального об'єму останнього.

Коефіцієнт пористості e_n визначали відношенням об'єму пор v_n до об'єму скелету $v_{ск}$:

$$e_n = \frac{v_n}{v_{ск}} \quad (1)$$

У дослідженнях пористість шару казеїну після прикладання останнього ступеня навантаження ототожнюють із його вологістю, яку визначали після завершення експерименту. Постійним на протязі усього експерименту залишається об'єм скелету казеїну $v_{ск}$, що визначали за формулою:

$$v_{ск} = (1 - W_n) \frac{v_n \cdot \rho_{зг}}{\rho_{ск}} \quad (2)$$

де W – масова вологість казеїну після останнього етапу навантаження, %;

v_n – об'єм казеїну після останнього етапу навантаження, м³.

Густина скелету $\rho_{ск}$ казеїну та густина його згустку $\rho_{зг}$, після останнього етапу навантаження відповідно:

$$\rho_{\text{ск}} = \rho_{\text{т}} (1 - W); \quad (3)$$

$$\rho_{\text{зг}} = \rho_{\text{р}} W + \rho_{\text{ск}}; \quad (4)$$

де $\rho_{\text{т}}$ – густина твердих частинок, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\rho_{\text{р}}$ – густина рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Коефіцієнт пористості казеїну на i -му етапі навантаження:

$$e_i = \frac{v_i - v_{\text{ск}}}{v_{\text{ск}}} \quad (5)$$

де v_i – об'єм згустку на i -му ступеня навантаження, м^3 .

Коефіцієнт стисливості a використовували для оцінки здатності казеїну до деформування. Його визначали із виразу:

$$a = \frac{\Delta e}{\Delta p} \quad (6)$$

де Δe – зміна коефіцієнту пористості, що відповідає певній зміні значення тиску Δp .

Також з метою оцінки деформаційної здатності казеїну використовували модуль стисливості G :

$$G = \frac{1 + e}{a}, \quad (7)$$

Для оцінки фільтраційних властивостей казеїну використовували питомий опір фільтруванню r :

$$r = \frac{\Delta p \cdot \tau}{\mu \cdot v_{\text{н}} \cdot h} - \frac{R}{h} \quad (8)$$

де Δp – напір, Па;

$v_{\text{н}}$ – питомий об'єм води, що профільтровується крізь шар казеїну, $\text{м}^3/\text{м}^2$;

μ – динамічна в'язкість води, Па·с;

τ – тривалість фільтрування, с;

$R_{\text{ф}}$ – сумарний опір фільтруванню перфорованих поверхонь та фільтрувального паперу, $R_{\text{ф}} = 2,3 \cdot 10^7 \text{ 1/м}$;

h – висота шару казеїну, м.

Для комплексної оцінки компресійних та фільтраційних характеристик використовували коефіцієнт консолідації b :

$$b = \frac{G}{\mu \cdot r_0}, \quad (9)$$

Виклад основного матеріалу. Для реалізації компресійно-фільтраційного сушіння важливим параметром матеріалу є його пружність, тобто здатність шару матеріалу відновлювати висоту шару після його деформації.

Результати дослідів свідчать, що при дії зовнішнього тиску на шар казеїну останній деформується, але при поступовому зменшенні значення цього тиску має місце часткове відновлення висоти шару. При розвантаженні шару казеїну відбувається часткове відновлення його висоти, яке досягає 88% від початкового значення висоти (рис. 2). Таким чином залишкова деформація складає 22%.

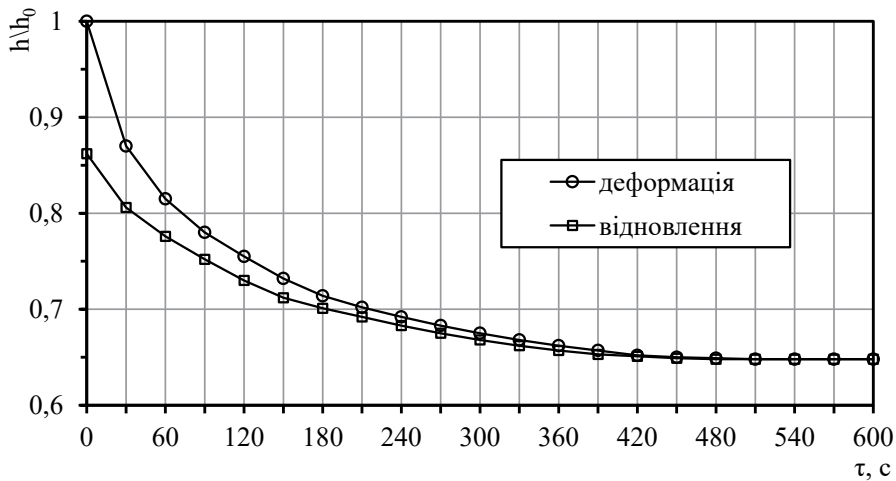


Рис. 2. Деформація та відновлення шару казеїну (тиск 3 кПа)

Здатність казеїну відновлювати висоту шару (на 88%) після припинення дії тиску свідчить про його пружні властивості та про можливість застосування компресійно-фільтраційного сушіння.

Отримані криві деформації казеїну при різних значеннях тиску йдуть майже паралельно одна до одної (рис. 3).

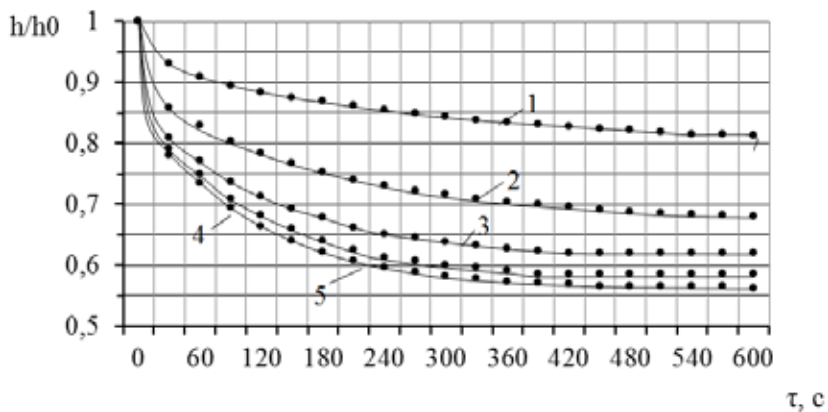


Рис. 3. Зміна відносної деформації шару казеїну у часі при різному тиску:
1) 1,0 кПа; 2) 2,0кПа; 3) 3,0 кПа; 4) 4,0кПа; 5) 5,0кПа

Це говорить про однозначну залежність компресійних характеристик казеїну від значення тиску. Так зниження пористості казеїну при зростанні тиску має майже лінійний характер (рис. 4)

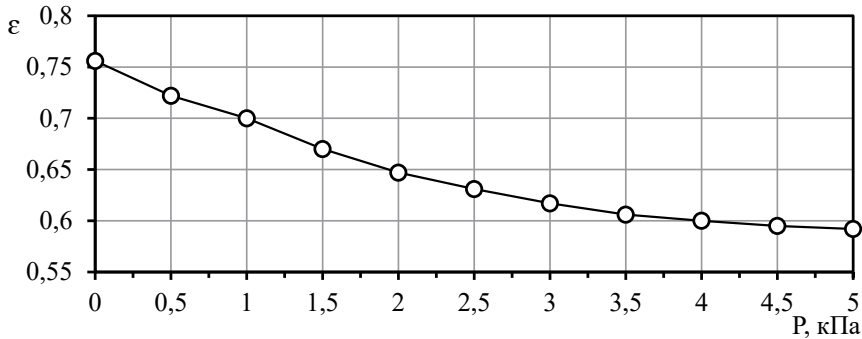


Рис. 4. Залежність пористості казеїну від тиску

Залежність коефіцієнта пористості від тиску (рис. 5) описується наступним рівнянням:

$$e = e_0 - 1,052 \left(\frac{p}{p^*} \right)^{0,38} \quad (10)$$

де e_0 – коефіцієнт пористості казеїну при тиску $P = 0$, $e_0 = 3,1$ кПа;

p – зовнішній тиск, кПа;

$p^* = 1$ кПа – дослідна константа.

Як видно з графіка, при відсутності навантаження пористість казеїну складає 0,75. Враховуючи залишкову деформацію казеїну, яка становить 22%, пористість шару після припинення дії навантаження становитиме 0,66. Таким чином, можна припустити, що при застосуванні компресійно-фільтраційного сушіння, об'єм сушильного агента, який може бути поглинений шаром казеїну при його релаксації становить 66% від початкового об'єму казеїну.

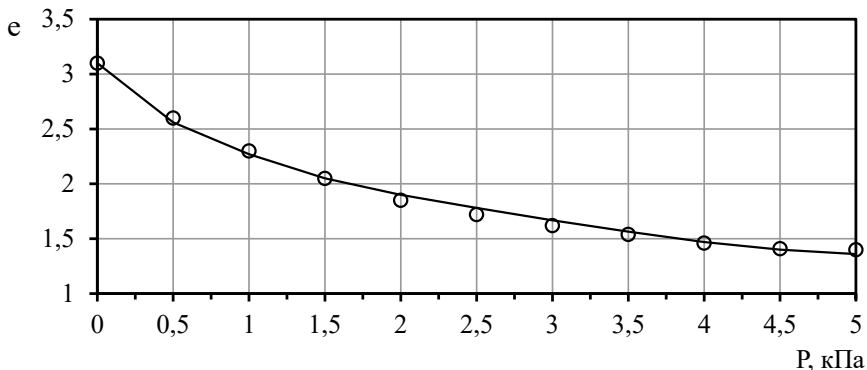


Рис. 5. Залежність коефіцієнта пористості білкової казеїну від величини тиску

Графічну залежність модуля стисливості казеїну від тиску можна умовно розбити на три ділянки (рис. 6):

I етап – $0,5 < P < 2,0$ кПа – незначне зростання модуля стисливості;

II етап – $2,0 < P < 4,0$ кПа – інтенсивне зростання модуля стисливості, яке пояснюється пружною деформацією шару (тіло Гука);

III етап – $P > 4,0$ кПа – пластична деформація, яка супроводжується руйнуванням агрегатів та білкових комплексів.

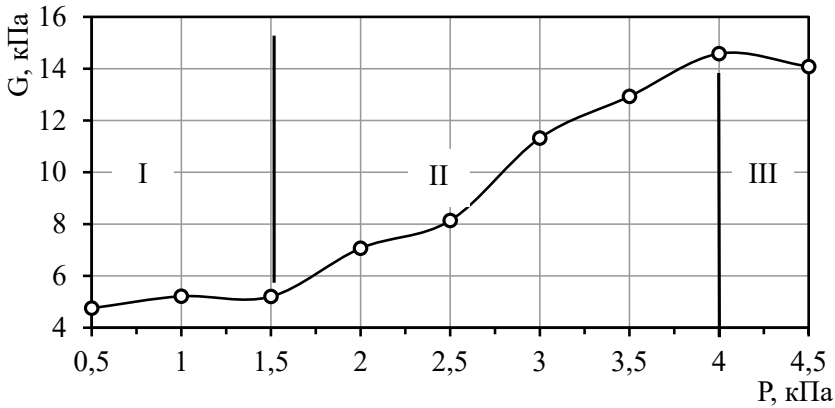


Рис. 6. Залежність модуля стисливості казеїну від тиску

Залежність питомого опору фільтруванню казеїну від тиску (рис. 7). при значеннях останнього від 0 до 4,5 кПа має лінійний вигляд та характеризується відносно невеликим зростанням. При тиску понад 4,5 кПа відбувається інтенсивне зростання питомого опору фільтруванню.

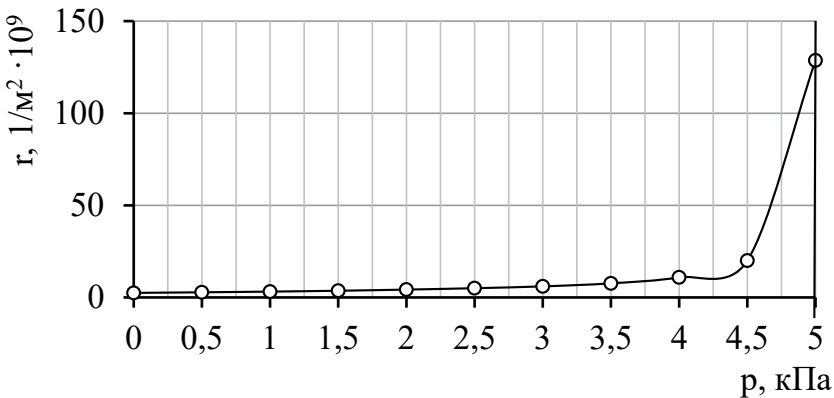


Рис. 7. Залежність питомого опору фільтруванню казеїну від тиску

Аналіз графічної залежності коефіцієнту консолідації від тиску (рис. 8) дозволяє зробити наступні висновки:

- при низькому тиску (до 2,5 кПа) коефіцієнт консолідації змінюється виключно в результаті деякої переорієнтації часток казеїну;
- при тиску 2,5-4,0 кПа розпочинається пружне ущільнення скелета шару, як наслідок, коефіцієнт консолідації казеїну досягає максимальних значень;
- при тиску понад 4,0 кПа розпочинається пластична деформація часток казеїну, що супроводжується стрімким зниженням коефіцієнту консолідації.

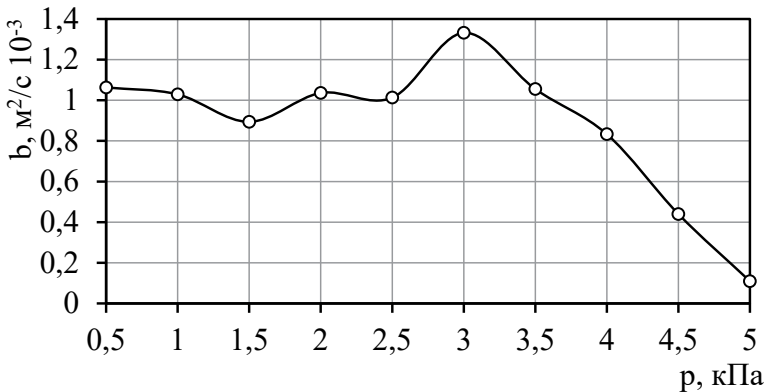


Рис. 8. Залежність коефіцієнта консолідації казеїну від тиску

Висновки. Результати досліджень компресійно-фільтраційних властивостей казеїну-сирцю свідчать, що останній володіє пружно-пластичними властивостями, які перебувають в однозначній залежності від значення тиску, що діє на шар казеїну.

Після припинення дії тиску на шар казеїну його висота відновлюється на 88% у порівнянні із висотою шару до деформації. Тому можна стверджувати про можливість застосування компресійно-фільтраційного сушіння по відношенню до казеїну-сирцю.

Результати дослідження пористості казеїну дозволили встановити, що об'єм сушильного агенту, який буде поглинатися шаром казеїну в процесі сушіння становитиме 66% від його об'єму. Це дозволить значно збільшити площу поверхні контакту фаз у порівнянні із іншими видами сушіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Hasan MU, Malik AU, Ali S, et al. Modern drying techniques in fruits and vegetables to overcome postharvest losses: A review. *J Food Process Preserv.* 2019, no. 2 (43).
2. Yu. Sniezkin, Zh. Petrova. Energy Consumption and Environmental Aspects of Drying Processes. *Scientific and Technical Innovation Projects of the National Academy of Sciences.* 2023, no. 19 (2), pp. 44-55.
3. Damir Dakovic, Miroslav Kljajic, Nikola Miliwojevic, Dordije Doder, Aleksandar S. Anelkovic. Review of Energy-Related Machine Learning Applications in Drying Processes. *Energies.* 2024 no., 1.
4. Tsotsas, E.; Mujumdar, A.S. (Eds.) *Modern Drying. Technology; Energy Savings; WILEY-VCH: Vol. 4.* Weinheim, Germany, 2012.
5. Кравець О.І., Шинкарик М.М. Компресійно-фільтраційне сушіння пружно-пластичних харчових мас. *Збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток технічних наук: проблеми та рішення»*, м. Брно (Чеська Республіка), 2018. С. 56-59.
6. Шинкарик М.М, Єресько Г.О., Формазюк Л.В., Ворошук В.Я. Дослідження компресійно-фільтраційних характеристик сирів з підплавлення сирної маси. *Наукові праці українського державного університету харчових технологій.* 2003. № 10 С. 111-114.

7. Михайлишин М.С., Шинкарик М.М., Радіо Л.В. Математичне моделювання процесів відтиску стисливих осадів. *Вісник ТДТУ*. 2001. № 2.(6) С. 112-118.

8. Шинкарик М.М., Кравець О.І. Дослідження компресійно-фільтраційних характеристик білкової дисперсної фази. *Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2012. № 1(15). С. 476-484.

REFERENCES:

1. Hasan, M.U., Malik, A.U., Ali, S., Imtiaz, A., Munir, A., Amjad, W., & Anwar, R. (2019) Modern drying techniques in fruits and vegetables to overcome postharvest losses: A review. *Journal of Food Process Preserv*, 2 (43) [in USA].

2. Sniezhkin, Yu. F., Petrova, Zh. O. (2023). Energy-Consumption and Environmental Aspects of Drying Processes. *Science and Innovation*, 19 (2), 44-55. [in Ukrainian].

3. Damir Dakovic, Miroslav Kljajic, Nikola Milivojevic, Dordije Doder, Aleksandar S. Andelkovic. (2024) Review of Energy-Related Machine Learning Applications in Drying Processes. *Energies*, 1. [in Switzerland].

4. Tsotsas, E.; Mujumdar, A.S. (Eds.) (2012). Modern Drying. Technology; *Energy Savings*; 4. [in Germany].

5. Kravets O.I., & Shynkaryk M.M. (2018). Kompresiino-filtratsiine sushinnia pruzhno-plastychnykh kharchovykh mas. *Zbirnyk tez Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Rozvytok tekhnichnykh nauk: problemy ta rishennia»*, 56-59. [in Cheska Respublika].

6. Shynkaryk M.M, Yeresko H.O., Formaziuk L.V., & Voroshchuk V.Ia. (2003). Doslidzhennia kompresiino-filtratsiinykh kharakterystyk syriv z pidplavlennia syrnoi masy. *Naukovi pratsi ukrainskoho derzhavnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii*, 10, 111-114. [in Ukrainian].

7. Mykhailyshyn M.S., Shynkaryk M.M., & Radio L.V. (2001). Matematyчне modeliuвання protsesiv vidtysku styslyvykh osadiv. *Visnyk TDTU*, 2 (6), 112-118. [in Ukrainian].

8. Shynkaryk M.M., & Kravets O.I. (2012). Doslidzhennia kompresiino-filtratsiinykh kharakterystyk bilkovoї dyspersnoi fazy. *Prohresyvna tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnystv restorannoho hospodarstva i torhivli*, 1 (15), 476-484. [in Ukrainian].