

УДК 66.081.63:666.64

THE PROMISING MATERIALS FOR THE FILTRATION MEMBRANES OF THE FOOD INDUSTRY

B. Pashchenko, O. Litvinenko*National University of Food Technologies***E. Shtefan***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***Key words:**

filtration membrane elements, deformation, computer simulation

Article history:

Received 26.09.2019

Received in revised form 19.10.2019

Accepted 25.11.2019

Corresponding author:

hoykke@gmail.com

ABSTRACT

The article presents the results of mathematical simulation through ceramic ultrafiltration membranes tubular type which based on alumina Al_2O_3 . Implementation of ultrafiltration processing processes carried out by using membrane filter elements. The sediment layer is formed on the surface of the membrane at separating high molecular weight compounds. It reduces capacity of the membrane. Periodic membrane regeneration is compulsory. The theoretical analysis method of membrane filtration process is worked out by the account of porous membranes structural — mechanic parameters. The ultrafiltration process mathematical description is presented with the ceramic filter elements using. The high concentrated colloid mixtures dividing are leads to the sediment on the membrane surface and its productivity reducing. Therefore a filter element and sediment layer are consist the porous double-base material under the operating loading action. Such filter systems mechanical behaviors are considered by the elastic-plastic material solid phase regime. Such method allows to define the regularity of sediment layer filtration coefficient changing while it compression and pores blocking time. The mathematical model of membrane elements deformation process is realized as a digital system PLAST-POR-M, that is intended for the computer design of the hollow membrane frame deformation process. Numerical experiments for the research of tube-type ceramic membrane deformation are conducted. The stress, deformations and porosity distributions in membrane element material is defined, and also, their change under the attached operating loading. The adequacy estimation of proposed modeling imagines about the change of filtration coefficient from the membrane stress-strain state is defined. It is shown that the proposed model is adequate when transferring results from quasi-planar elementary parts of the membrane to its full area or volume.

DOI: 10.24263/2225-2916-2019-26-13

© Б. С. Пашченко, О. А. Литвиненко, Є. В. Штефан, 2019

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ КЕРАМІЧНОЇ МЕМБРАНИ В ПРОЦЕСІ УЛЬТРАФІЛЬТРАЦІЇ ХАРЧОВИХ СЕРЕДОВИЩ

Б. С. Пашенко

О. А. Литвиненко, д-р техн. наук

Національний університет харчових технологій

Є. В. Штефан, д-р техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

У статті наведено результати імітаційного математичного моделювання фільтрування через керамічні ультрафільтраційні мембрани трубчастого типу. Модель ураховує структурно-механічні параметри та умови оброблення дисперсної мультикомпонентної системи. Цифрова модель PLAST-POR-M, запропонована авторами, імітує процес деформування порожнистого каркасу мембрани. Отримано графічні залежності та числові значення напружень деформації в часі, розподіл пористості від величини дотичних напружень та еквівалентної деформації частини фільтрувального елемента у вигляді окремого сегмента, так і повного каркасу мембранного елемента. Встановлено, що зміна пористості при цьому має лінійну залежність під дією еквівалентної деформації та логарифмічну під дією дотичних напружень. Показано, що запропонована модель є адекватною при перенесенні результатів від квазіпласких елементарних частин елемента до повної його площі або об'єму.

Ключові слова: *фільтраційні мембранні елементи, деформація, комп'ютерне моделювання.*

Постановка проблеми. Однією з найважливіших проблем соціально-економічного розвитку суспільства є вдосконалення структури харчової промисловості. Для цього потрібно забезпечити реалізацію спектра наукових, технічних, економічних та екологічних питань, що потребує комплексного поєднання різноманітних сучасних технологій. Серед них особливе місце посідають мембранні технології, зокрема ультрафільтрація. Порівняно з традиційними методами розділення харчових середовищ, такі процеси забезпечують енергетично- та екологічно раціональні варіанти реалізації апаратурних схем розділення та концентрування. Реалізація процесів ультрафільтраційного оброблення здійснюється за допомогою полімерних мембранних фільтрувальних елементів (ФМЕ), які мають селективну проникність, що визначається їх фізико-механічними та експлуатаційними властивостями й умовами проведення технологічного процесу. Мембрани виготовляють із синтетичних полімерів, зокрема поліаміду, полісульфону, полієфірсульфону тощо. При розділенні високомолекулярних сполук на поверхні мембрани утворюється гелеподібний осад, який знижує її продуктивність. Отже, періодична регенерація мембран є обов'язковою складовою технологічного процесу. Однак полімерні матеріали мембран з кожним циклом регенерації неминуче втрачають свої експлуатаційні властивості, що негативно впливає на перебіг ультрафільтрації.

Одним із перспективних конструктивних матеріалів є кераміка на основі оксиду алюмінію Al_2O_3 , вироби з якої відрізняються від інших хімічною інертністю і високою зносостійкістю за різних умов експлуатації [1; 2]. Очевидно, що використання кераміки для виготовлення ФМЕ дасть змогу, не порушуючи структуру і

властивостей мембран, збільшити кратність циклів їх регенерації при використанні більш хімічно активних реагентів [3; 4].

Водночас ефективність впровадження мембранних технологій обмежується складністю врахування структурно-механічних параметрів сировини, властивостей фільтрувальних елементів та структури осаду, що виникає на поверхні мембрани. Для забезпечення ефективного використання мембранних методів розділення у харчових технологіях доцільно на етапі проектування відповідного обладнання враховувати технологічні режими їх експлуатації, деформацію фільтрувальних елементів та ущільнення шару осаду, що призводить до закупорювання порожнин мембрани і зниження їх продуктивності.

Слід зазначити, що такі особливості роботи досить ускладнені при безпосередньому експериментальному вивченні й аналізі. Тому важливу роль у дослідженні мембранних процесів відіграє математичне моделювання. Рішення отриманих залежностей може здійснюватися різними наближеними або чисельними методами [5]. Відомі математичні моделі для опису процесів ультрафільтрації включають параметри, що не піддаються прямому вимірюванню або обчисленню. До них відносять константи, які характеризують швидкість накопичення забруднень, питомого гідравлічного опору їх шару тощо. Новітні досягнення у сфері математичного програмного забезпечення дають змогу вирішити цю проблему на основі комплексної методики досліджень та інформаційних технологій проектування (ІТП). Розроблення такої методики є актуальним напрямком розвитку наукових досліджень у цій галузі харчових технологій.

Метою дослідження є розроблення імітаційної моделі деформування керамічного МФЕ під дією дотичних напружень унаслідок динамічних навантажень і оцінка її придатності для моделювання об'єму МФЕ з урахуванням фактора форми і структурного коефіцієнта. Для перевірки розрахованих показників одержані числові значення імітаційного моделювання деформації реалізувати в алгоритмах сучасного програмного забезпечення.

Матеріали і методи. Для математичного моделювання умов експлуатації ультрафільтраційних елементів запропонована розроблена інформаційна технологія проектування, в основу якої закладена математична модель порожнистого середовища [6]. Запропонований варіант ІТП розглядає процес проходження дисперсного середовища крізь ультрафільтраційну мембрану у вигляді мультикомпонентної системи взаємопов'язаних елементів: порожнистого каркасу мембрани, газорідної фази, що заповнює пори мембрани, тиску нагнітання, умов фіксації мембрани тощо.

Математична модель використовує систему рівнянь, які складають основу крайової задачі механіки дисперсних систем, що дає змогу врахувати структурно-механічні та реологічні параметри твердої фази матеріалу при створенні математичної моделі деформаційних процесів. Форма отриманих визначальних співвідношень надає можливість ефективно використовувати їх для скінченно-елементного аналізу механічної поведінки дисперсних матеріалів на основі розробленої цифрової моделі рівноважних (пружно-пластичних) процесів деформування компактних матеріалів.

Для реалізації математичної моделі МФЕ розбивається на пласкі напівсегменти, структурна деформація кожного з яких моделюється окремо, а потім програмно розповсюджується по всьому об'єму досліджуваного елемента з урахуванням фактору форми і структурного коефіцієнта.

На початковому етапі приймається концепція подання каркасу мембрани як порожнистої твердої деформованої структури з рідиною чи газом, якій надають фізичні властивості, що феноменологічно відображають молекулярну структуру середовища і його внутрішні переміщення, які відбуваються в мембрані. Для опису механічної поведінки таких матеріалів необхідно використовувати параметри напружень, деформацій, щільності, а також швидкості їх зміни. Характеристики мають локальну природу і визначаються за допомогою операцій граничного переходу, коли елементи простору (об'єми і поверхні) стягуються до точок (матеріальних).

Динамічні аспекти механічної поведінки каркасу регламентуються рівняннями балансу у формі закону збереження кількості руху з урахуванням закону збереження маси у межах цього елемента, причому для кожної з фаз дисперсної системи рівняння відносного руху представляють у вигляді [6]:

$$\alpha_1 \left(\rho_1 \frac{du}{dt} - \rho_2 \frac{dv}{dt} \right) - \nabla \sigma^f - \frac{\xi^2}{\alpha_2^2 \alpha_1 \mu (v-u)} - \alpha_1 (\rho_1 - \rho_2) G = 0; \quad (1)$$

$$\rho_2 \frac{dv}{dt} = -\nabla P - \frac{\xi^2}{\alpha_2^2 \alpha_1 \mu (v-u)} + \rho_2 G = 0, \quad (2)$$

де μ — коефіцієнт динамічної в'язкості (кг·с/м) для нестискої рідини; ξ — узагальнений, що враховує конфігурацію простору пор дисперсійного середовища (коефіцієнт звивистості).

Для встановлення зв'язку між деформаціями та напруженнями розглядають окремих мікрофрагмент (частку) дисперсної системи, формулюють співвідношення його механічних параметрів і виконують усереднення параметрів по макрооб'єму МФЕ. Для цього розглядають ідеалізований мікрофрагмент — елементарну ділянку у вигляді сегмента півкола (рис. 1).

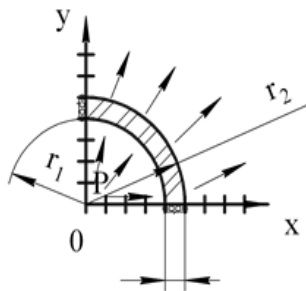


Рис. 1. Схема «тупикової» ультрафільтрації у квазіпласкій постановці на координатній площині $OxOy$: r_1 — внутрішній радіус МФЕ; r_2 — зовнішній радіус МФЕ; P — робочий тиск процесу (тиск у системі); δ — товщина МФЕ

Матеріал локальної ділянки вважається нестисним, а ординати вісі Ox збігаються з напрямком одного з головних компонентів тензора швидкостей деформації.

В обраному сегменті розглядають лише дві компоненти швидкості переміщень точок матеріалу v_r і v_x , які задовольняють рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Для уточнення результатів прийнятої ідеалізації розглядають параметр швидкості локальної енергії деформування порожнистого каркасу з подальшим її усередненням по всій площі та об'ємі сегмента [6]:

$$D = \sigma_0 \gamma_0 \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{\psi e^2}{\gamma_0^2} + \frac{\phi^2}{\gamma_0^2}} \right)^{n+1} + \sigma_T \gamma_0 \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{\psi e^2}{\gamma_0^2} + \frac{\phi^2}{\gamma_0^2}}, \quad (4)$$

де σ_T — границя текучості, γ — параметр інтенсивності швидкостей деформації; q, σ_0, γ_0, n — константи апроксимації емпіричних даних.

На основі (4) формулюється загальна структура визначальних співвідношень через компоненти тензорів напружень σ_{ij} і швидкостей деформацій e_{ij} [6]:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{\sigma_0 \left(\frac{w}{\gamma_0} \right)^n + \sigma_T}{w} \right) \left[\phi e_{ij} + \left(\psi - \frac{1}{3} \phi \right) e \delta_{ij} \right]. \quad (5)$$

Отже, визначальні співвідношення незворотних умов деформування порожнистого каркасу мембрани такі [6]:

$$\sigma_{ik} = \frac{1}{\lambda(\Phi)} \left[\phi e_{ik}^H + \left(\psi - \frac{1}{3} \phi \right) e^H \delta_{ik} \right]. \quad (6)$$

Особливістю моделі є те, що поняття рівноважної течії матеріалу виявляється альтернативним його пружно-пластичному деформуванню.

Рівняння (6) дає змогу визначити незворотну складову швидкості деформування ФМЕ [6]:

$$e_{ik}^H = \frac{\sqrt{\phi \gamma^2 + \psi e^2}}{\phi \psi \left(\sqrt{\rho k} + 2 \eta_k \sqrt{\phi \gamma^2 + \psi e^2} \right)} \left[\phi \sigma_{ik} + \left(\frac{1}{3} \phi - \psi \right) p \delta_{ik} \right]. \quad (7)$$

Для визначення можливостей застосування запропонованої імітаційної математичної моделі деформації керамічного елемента в процесі ультрафільтрації технологічних середовищ як об'єкта моделювання використано реальний МФЕ — мембрана Inopor ultra на основі α -модифікованого оксиду алюмінію Al_2O_3 , фізико-механічні властивості якої наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики керамічної мембрани Inopor ultra

Характеристика	Показник
Густина δ , г/см ³	3,9
Модуль Юнга E , ГПа	365
Коефіцієнт тертя μ	0,20
Діаметр порожнин d , мкм	3-5
Середня кількість порожнин на 1 мм ²	10
Міцність на стиск σ , МПа	2100-2600
Робоча площа мембрани, $S_{кор}$, м ²	0,0058
Пористість мембрани	55%

Візуалізацію процесу деформування сегмента керамічного елемента ФМЕ здійснювали в програмному комплексі PLAST-POR-M [6].

На рис. 2 наведено ізограми розподілу порожнистостей внаслідок деформації сегмента керамічного ФМЕ на моделі порожнистого каркаса, утвореного сіткою скінченних елементів з точками прикладення навантажень.

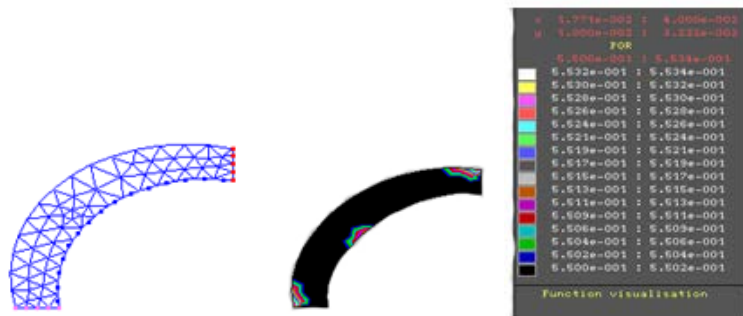


Рис. 2. Візуалізація розподілу порожнистості при деформації сегмента керамічного ФМЕ

Рис. 3 ілюструє розподіл по площині дотичних напружень внаслідок деформації, які виникають в ФМЕ при зміщенні координат порожнистого каркаса, утвореного сіткою скінченних елементів.

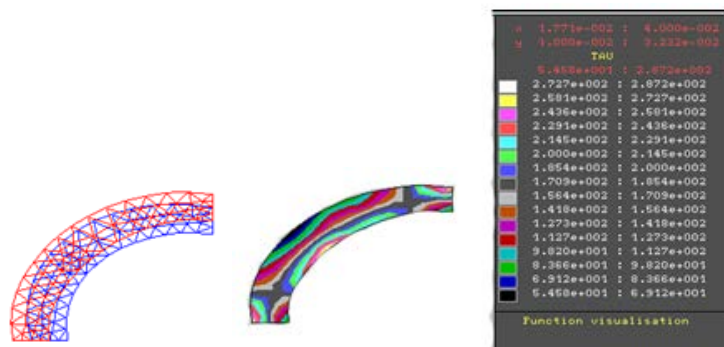


Рис. 3. Візуалізація розподілу дотичних напружень внаслідок деформації сегмента ФМЕ

Узагальнена ізограма розподілу еквівалентних деформацій керамічного ФМЕ в процесі ультрафільтрації дисперсної системи наведена на рис. 4.

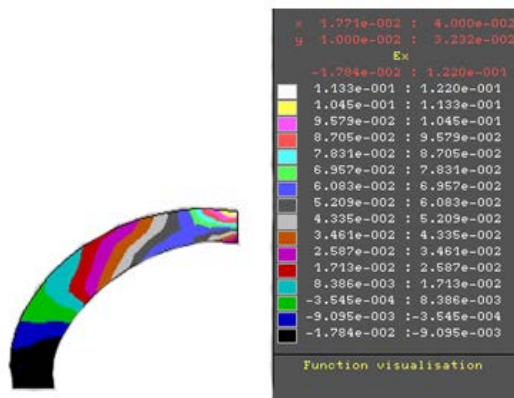


Рис. 4. Візуалізація розподілу еквівалентних деформацій ФМЕ

На основі проведеного моделювання отримано графічні залежності напружень деформації у часі, розподіл порожнистості від величини дотичних напружень та еквівалентної деформації сегмента керамічного МФЕ (рис. 5—6).

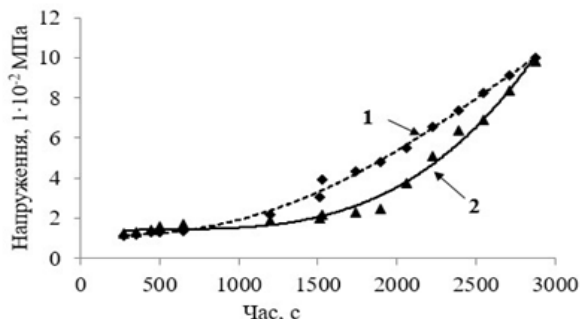


Рис. 5. Змінення деформації МФЕ від тривалості ультрафільтраційного оброблення: 1 — еквівалентні деформації; 2 — дотичні напруження

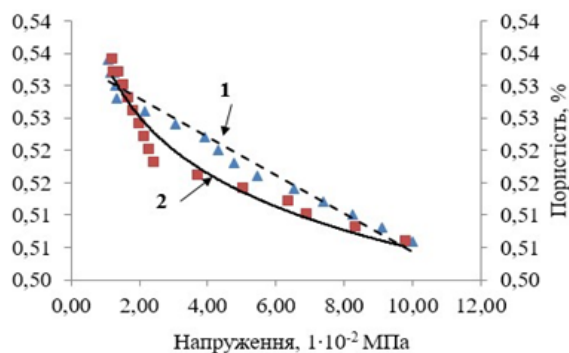


Рис. 6. Залежність розподілу порожнистості під дією: 1 — еквівалентної деформації; 2 — дотичних напружень

Аналіз одержаних результатів показує, що під дією деформації керамічного МФЕ в процесі ультрафільтрації в структурі мембрани відбувається відносно невелика зміна пористості, яка має лінійну залежність під дією еквівалентної деформації та логарифмічну під дією дотичних напружень. Аналогічно змодельовано процес деформування повного об'єму керамічного мембранного елемента з урахуванням фактора форми і структурного коефіцієнта та реалізовано у алгоритмах PLAST-POR-M.

Результати досліджень. За результатами імітаційного моделювання одержано результати, за якими побудовано графічні залежності, наведені на рис. 7, 8.

Порівняльний аналіз результатів, одержаних при моделюванні розподілу порожнистості внаслідок дії еквівалентних деформаційних напружень, показує, що графічні залежності (рис. 5, 6) і (рис. 7, 8) мають дещо відмінний характер розподілу, хоч він і знаходиться в межах статистичної похибки. Це можна пояснити тим, що при моделюванні сегментованої частини МФЕ фактор форми несуттєво впливає на подальшу зміну і підвищення величини напружень. При відображенні характеру деформації по всьому об'єму МФЕ роль фактора форми стає більш значущим елементом розрахунку, що підтверджуються розбіжністю на графіках.

Але ця величина є недостатньою для того, щоб істотно вплинути на кінцевий результат моделювання.

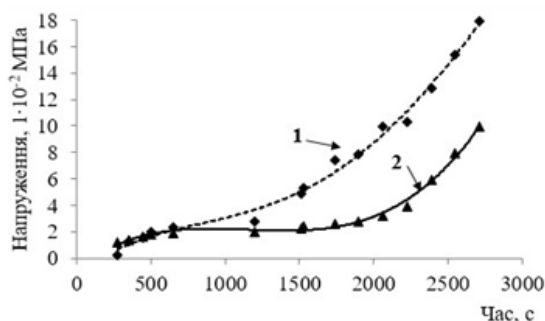


Рис. 7. Залежність зміння деформації керамічного МФЕ від тривалості ультрафільтрації: 1 — еквівалентні деформації; 2 — дотичні напруження

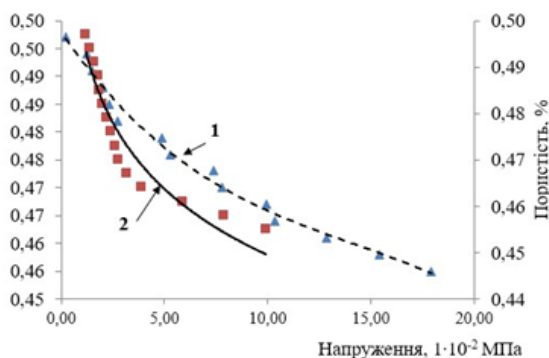


Рис. 8. Залежність розподілу порожнистостей під час деформації під дією: 1 — еквівалентної деформації; 2 — дотичних напружень

На підставі порівняльного аналізу результатів імітаційного математичного моделювання можна стверджувати, що розроблена інформаційна технологія проектування дає змогу врахувати умови експлуатації керамічних фільтрувальних елементів залежно від їх фізико-механічних властивостей, відповідає поставленим завданням і є дієвим засобом їх вирішення.

Висновки. Розроблена математична модель для дослідження процесу мембранного фільтрування з урахуванням структурно-механічних параметрів фільтрувальних керамічних мембран на основі інформаційних технологій проектування розглядає проходження оброблюваної дисперсної системи крізь ультрафільтраційну мембрану у вигляді мультикомпонентної системи взаємопов'язаних елементів, що дає змогу визначити характер її деформації. На основі математичної моделі розроблена цифрова — PLAST-POR-M, яка імітує процес пластичного деформування пористого каркасу ФЕ під час ультрафільтрації. Отримано графічні залежності та числові значення напружень деформації в часі, розподіл пористості від величини дотичних напружень та еквівалентної деформації як сегмента, так і повного каркасу ФМЕ. Зміна пористості при цьому має лінійну залежність під дією еквівалентної деформації та логарифмічну під дією дотичних напружень. В той же час її величина є незначною, отже, основним фактором при зниженні продуктивності мембрани є ущільнення структури шару осаду. Невеликі розбіжності отри-

маних числових значень показують, що запропонована модель є адекватною при перенесенні результатів від квазіпласких елементарних частин мембрани до повної її площі або об'єму з урахуванням параметрів геометричної форми.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hees M. Verwirbelungen halten Keramik Sauber / M. Hees // Ernährungsindustrie. — 2001. — № 6. — P. 64—65.
2. Litvinenko A. Effect of Phase Composition on Cavitation Resistance of Ceramics / A. Litvinenko, Yu. Boyko, B. Pashchenko, Yu. Sukhenko // Advances in Design, Simulation and Manufacturing Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018, June 12—15, Sumy, Ukraine, 2018. — Springer International Publishing AG. Part of Springer Nature. — Issue 1. — P. 299—305.
3. Литвиненко О. А. Зносостійкість кераміки для фільтраційних мембран / О. А. Литвиненко, Б. С. Пащенко // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». — Луцьк: ЛНТУ, 2018. — В. 61. — С. 105—109.
4. Пащенко Б. С. Визначення концентрацій фаз при мембранному фільтруванні рідких середовищ / Б. С. Пащенко, Є. В. Штефан // Наукові праці ОНАХТ. — Одеса: ОНАХТ, 2016. — Т. 80(1). — С. 94—97.
5. Бабій М. С. Теорія програмування: навч. посіб. / М. С. Бабій, О. П. Чекалов. — Суми: СумДУ, 2008. — 181 с.
6. Пащенко Б. С. Перспективні матеріали для фільтраційних мембран харчової промисловості / Б. С. Пащенко, Є. В. Штефан, О. А. Литвиненко // Харчова промисловість. — К.: НУХТ, 2016. — В. 20. — С. 123—129.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ КЕРАМИЧЕСКОЙ МЕМБРАНЫ В ПРОЦЕССЕ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ ПИЩЕВЫХ СРЕД

Б. С. Пащенко, О. А. Литвиненко

Национальный университет пищевых технологий

Е. В. Штефан

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

В статье приведены результаты имитационного математического моделирования через керамические ультрафильтрационные мембраны трубчатого типа. Модель учитывает структурно-механические параметры и условия обработки дисперсной мультикомпонентной системы. Цифровая модель PLAST-POR-M, предложенная авторами, имитирует процесс деформирования полого каркаса мембраны. Получены графические зависимости и числовые значения напряжений деформации во времени, распределение пористости от величины касательных напряжений и эквивалентной деформации фрагмента фильтровального элемента в виде отдельного сегмента, так и полного каркаса мембранного элемента. Установлено, что изменение пористости при этом имеет линейную зависимость под действием эквивалентной деформации и логарифмическую под действием касательных напряжений. Показано, что предложенная модель является адекватной при переносе результатов квазиплоских элементарных частей элемента до полной его площади или объема.

Ключевые слова: *фильтрационные мембранные элементы, деформация, компьютерное моделирование.*