

Виявлення особливостей гідродинаміки в роторно-дисковому плівковому випарному апараті

С. І. Костик, В. Ю. Шибецький, С. В. Фесенко, В. М. Поводзинський

Наведено узагальнення отриманих результатів комп'ютерного моделювання фізичних процесів в роторно-дисковому плівковому випарному апараті. Оптимізація режиму роботи не може бути здійснена без встановлення особливостей протікання фізичних процесів. Запропоновано комп'ютерну модель гідродинаміки, з урахуванням всіх конструкційних особливостей, початкових та граничних умов. Результати комп'ютерного моделювання дають можливість адекватно оцінювати ефективність використання роторно-дискового плівкового випарного апарату (РДПВА) для концентрування термолабільних матеріалів. Встановлені особливості протікання фізичних процесів в конструкції РДПВА, за допомогою комп'ютерного моделювання гідродинаміки у середовищі ANSYS використовуючи k - ϵ модель турбулентності. В результаті моделювання отримано поля швидкостей рідин, що концентрується ($w_{\max}=0,413$ м/с), та газової фази ($w_{\max}=8,176$ м/с), а також величину значень напружень зсуву $\tau=0,94 \cdot 10^{-6}$ Па. Встановили, що для газового теплоносія характерні високотурбулентні потоки з максимальними значеннями кінетичної енергії $TKE_{\max}=8,985 \cdot 10^{-1}$ м²/с². Достовірність результатів забезпечується коректністю, повнотою та адекватністю фізичних припущень в постановці задачі та на етапі її розв'язку із застосуванням системи автоматизованого проектування ANSYS. Встановлено, що запропонована конструкція є ефективною альтернативою обладнання для концентрування розчинів. Отримані дані можуть бути використані при проектуванні тепломасообмінного обладнання для високоефективного зневоднення термолабільних матеріалів

Ключові слова: роторно-дисковий плівковий випарний апарат, тепловіддача, k - ϵ модель турбулентності, вимушена конвекція, ANSYS, CFX, напруження зсуву

1. Вступ

Сучасні економічні реалії спонукають виробників до скорочення витрат на одиницю продукції та підвищення продуктивності виробничих ліній. Не є винятком і фармацевтична галузь, що має велику номенклатуру продукції, певні види якої є високоспецифічними і вимагають особливих умов. Зокрема це пробіотичні лікарські засоби, вакцини та гормони, які представлені у вигляді ліофілізату і є термолабільними речовинами. Зневоднення таких термолабільних речовин потребує пошуку нових технологій та вдосконалення вже існуючих.

Основні способи зневоднення матеріалів не стійких до тривалої дії високих температур, які наразі використовуються в світовій практиці: сублімаційне сушіння, вакуумне сушіння, розпилювальне сушіння, сушіння в киплячому шарі, плівкові випарні апарати [1]. В усіх типах апаратів, де реалізуються запро-

поновані процеси, є ряд негативних чинників, що призводить до дезінтеграції діючих речовин, а саме за рахунок високої температури, зміни агрегатного стану (заморожування при сублімації), а також за рахунок механічних пошкоджень викликаних напруженнями зсуву. В кожному конкретному випадку необхідно розглядати сукупну дію всіх вищеперерахованих негативних чинників. Апарати плівкового типу постають цікавою альтернативою, тому що температура зневоднення не перевищує температуру мокрого термометра, вони володіють розвинутою питомою поверхнею тепломасообміну, а також в них наявна можливість мінімізувати пошкодження живих клітин за рахунок напружень зсуву.

На основі зазначеної необхідності використання даного типу апаратів та їх високої ефективності запропонована конструкція роторно-дискового плівкового випарного апарату (РДПВА). Вивчення особливостей гідродинаміки РДПВА та розробка методики розрахунку на основі математичного та комп'ютерного моделювання, що, в подальшому, дасть можливість реалізувати дану технологію на виробництві, є актуальною інженерною задачею.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Реалізацією альтернативних шляхів зневоднення термолабільних речовин може виступати стрічкова сушка з використанням теплового насосу [2]. В роботі розглядаються засади математичного моделювання процесу сушіння та наводиться схема установки для проведення процесу. Однак через властивості цільового продукту даний тип сушки не можна використовувати в фармації та біотехнології. Залишаються не вирішеними питання підтвердження адекватності математичної моделі комп'ютерним моделюванням або фізичним експериментом.

Технологія вакуумного сушіння дає можливість отримання ліофілізованих продуктів, але при цьому споживає велику кількість енергії. Для збільшення енергоощадності процесу розроблено схему з використанням теплових насосів і декількох камер сушіння [3]. Даня схема базується на використанні деревини для отримання енергії, а це, в умовах необхідності виконання вимог належної виробничої практики фармацевтичними заводами, унеможлиблює її використання на підприємстві.

Ще одним способом отримання готової лікарської форми, що включає одночасне сушіння і формування, є використання 3-d принтера [4]. В проведеному дослідженні підтверджено можливість використання технології методу шарового наплавлення для отримання персоналізованих лікарських засобів та їх стабільність. Робота залишає відкритими питанням використання способу для речовин, що мають нижчу температуру деструкції та продуктивності технології.

Для підвищення продуктивності технологічної лінії та покращення якості готового термолабільного продукту може використовуватися комбінований вплив декількох чинників. Реалізація такої взаємодії наведена в роботі авторів з Бразилії, які використовують ультразвук та вакуум [5]. Метою даної роботи було оцінити вплив ультразвукових хвиль і вакууму, комбінованих чи ні, на кінетику сушіння та вплив на якість продукту таких методів. Результати досліджень вказують на зменшення часу сушіння та покращення характеристик продукту.

Однак використання методу для клітин мікроорганізмів, які є більш чутливими до ультразвуку, потребує подальшого дослідження.

В різноманітних галузях виробництва застосовується методи оцінки ефективності тепломасообмінних та гідродинамічних процесів і при цьому вирішуються задачі оптимізації з побудовою нових методів досліджень [6].

Ефективна інтенсифікація процесів теплообміну в тепломасообмінному обладнанні є досить складною і актуальною задачею, яка напряму залежить від особливостей гідродинаміки [7]. В наведеній роботі розглядається моделювання різних режимів руху рідини при переході від ламінарного до турбулентного руху. Проте дане дослідження проведене для дуже вузького кола прикладних задач і може слугувати виключно методологічною основою для іншого обладнання.

При конструюванні та удосконаленні тепломасообмінного обладнання необхідно звертати увагу на велику кількість різноманітних факторів, які можуть вплинути на загальну технічну реалізацію і окремі конструктивні рішення. Ефективність зневоднення в апаратах плівкового типу напряму залежить від градієнту концентрацій, градієнту температур, геометрії конструкції, швидкості руху теплоносіїв, матеріалів з яких виготовлені елементи обладнання та площі поверхні тепломасообміну. Слід зазначити, що у випадку зневоднення термолабільних матеріалів, особливо біотехнологічних та ферментних препаратів, важливим фактором є час контакту з теплоносієм та напруження зсуву, які виникають в потоці рідини при її концентруванні [8].

На основі проведеного аналізу була розроблена конструкція РДПВА, яка дозволяє концентрувати термолабільні розчини з високою ефективністю [1]. На створеному стенді було проведено ряд експериментальних досліджень, в результаті яких було знято криві сушки та отримано емпіричне критеріальне рівняння Нуссельта, що дозволяє розраховувати параметри тепловіддачі [9]. Для даної конструкції була запропонована математична модель гідродинаміки наростаючої плівки рідини на поверхні дискової насадки, яка частково занурюється в рідину і виноситься в зону контакту з теплоносієм [10].

Математичну модель з урахуванням прийнятих припущень:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{\partial W_\phi}{\partial \phi} = 0; \\ \rho \left(W_r \frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{W_\phi}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \phi} - \frac{W_\phi^2}{r} \right) = \\ = \rho g_r + \mu \left(\frac{\partial^2 W_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W_r}{\partial \phi^2} - \frac{W_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial W_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial^2 W_r}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left(W_r \frac{\partial W_\phi}{\partial r} + \frac{W_\phi}{r} \frac{\partial W_\phi}{\partial \phi} + \frac{W_r \cdot W_\phi}{r} \right) = \\ = \rho g_\phi + \mu \left(\frac{\partial^2 W_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_\phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W_\phi}{\partial \phi^2} - \frac{W_\phi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial W_r}{\partial \phi} + \frac{\partial^2 W_\phi}{\partial z^2} \right). \end{array} \right. \quad (1)$$

Граничні умови:

$$z = 0; W_r = 0; W_\phi = \omega \cdot r; \quad (2)$$

$$z = \delta; W_r = 0; W_\phi = 0. \quad (3)$$

Дана математична модель була вирішена в аналітичному вигляді і дала змогу отримати поле швидкостей та розподіл товщини плівки по поверхні дискової насадки РДПВА (рис. 1), яка становила від $2,628 \cdot 10^{-4}$ м до $7,1 \cdot 10^{-4}$ м [10].

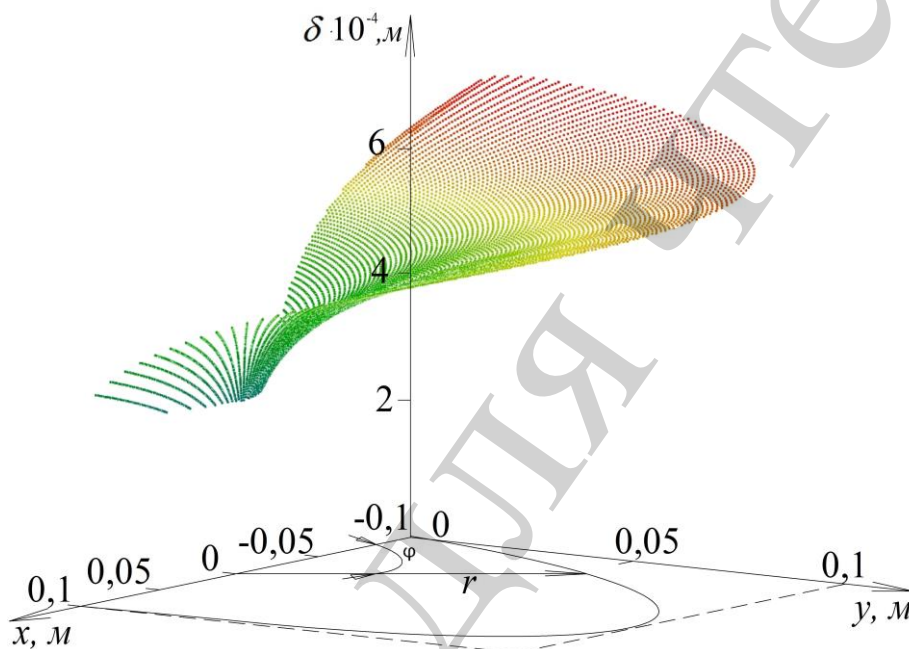


Рис. 1. Графік поверхні плівки, що утворюється при зануренні диска в рідину

Однак проведені раніше дослідження не в повній мірі описують фізичні процеси в РДПВА. Залишаються нерозкритими наступні особливості: гідродинаміка плівки на поверхні дискової насадки, розподіл температурних полів, розподіл полів швидкостей, як рідини, що концентрується так і газового теплоносія. Залишається невирішеною задача дифузії при випаровуванні плівки та не встановлено величину напружень зсуву при русі насадки в рідині.

Математичний опис вищезазначених особливостей є досить складною задачею, що залежить від багатьох параметрів. Зазвичай для вирішення таких моделей використовується ряд спрощень, які впливають на точність результатів і адекватність моделей.

Під час дослідження системи, при вирішенні нестандартних задач, може з'явитися необхідність опису і дослідження додаткових факторів, які впливають на протікання процесу. В такому випадку, в першу чергу, виникає необхідність залучення високопродуктивних комп'ютерних систем [11]. Платформа ANSYS зарекомендувала себе, як провідний програмний продукт для вирішення задач

пов'язаних з вивченням фізичних процесів, які протікають в тепломасообмінному обладнанні [12]. Опис процесів, що протікають в рідинних системах, в середовищі ANSYS базується на використанні k - ϵ моделі турбулентності [13]. Однак для доведення адекватності моделі у більшості випадків все ж виникає потреба в підтвердженні правильності прийняття рішень шляхом експериментальних досліджень [14].

Математичний опис та комп'ютерне моделювання фізичних процесів, що відбуваються в плівкових апаратах, на сьогоднішній день, практично не описані у відкритих джерелах, тому дане дослідження присвячене узагальненню знань одержаних при створенні комп'ютерної моделі гідродинаміки в РДПВА.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження було встановлення особливостей гідродинаміки та ефективності тепломасообміну поверхні дискової насадки РДПВА в умовах вимушеної конвекції.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити комп'ютерну модель гідродинаміки РДПВА з урахуванням всіх конструктивних особливостей та встановити оптимальні робочі параметри;
- оцінити можливість використання РДПВА для концентрування термолабільних матеріалів біотехнологічного синтезу.

4. Матеріали і методи дослідження гідродинаміки роторно-дискового плівкового випарного апарата

4.1. Методика комп'ютерного моделювання

Комп'ютерне моделювання гідродинаміки та тепломасообміну потребує створення 3D моделі об'єкта дослідження, у випадку РДПВА, це геометрія двох об'ємів: рідини і газової фази. Обидва об'єми методом кінцевих елементів розбиваються на сукупність елементарних складових у вигляді сітки, за допомогою вбудованого модуля Mesh. Для рідкої фази задаються граничні умови, як нерухомої рідини по поверхні контакту зі стінками РДПВА визначається як «Wall», також задаються параметри температури та гравітаційної сили. Газовий теплоносій задається, як рухома система з фізичними та динамічними параметрами. Границя взаємодії поверхонь газового і рідинного об'єктів, які контактують визначається як «General connection», тобто швидкість на поверхні одного елемента за величиною і напрямом, в кожній конкретній точці, дорівнює швидкості на поверхні іншого. Така реалізація наведена в [15]. Відмінність полягає у відсутності обертового руху, що при спрощенні моделі виключає необхідність подальшого налаштування даної взаємодії. Для зменшення кількості ітерацій розглядається об'єм однієї дискової насадки РДПВА, при чому бокові поверхні вирізаного елемента задаються на границях, як «Symmetry» [16]. Такий підхід дає можливість зменшити вимоги до розрахункової потужності комп'ютера, однак має ряд обмежень і може використовуватися лише в випадках відсутності збурень в відкинутій зоні.

Аналогічна методологія описана в публікаціях [17], яка на основі створення фізичної комп'ютерної моделі, дозволяє встановити оптимальні параметри процесу на стадії проектування обладнання.

4. 2. Геометрія конструкції та принцип роботи роторно-дискового плівкового випарного апарату

РДПВА складається з корпусу із ємністю під розчин 1, теплообмінної сорочки 2, каналу для руху газового теплоносія 3, валу на якому розміщено ряд дискових насадок 4. Диски частково занурені в розчин, що підлягає зневодненню, і приводяться приводом 5 в обертальний рух, при цьому виносять плівку в зону контакту з газовим теплоносієм (рис. 2) [1].

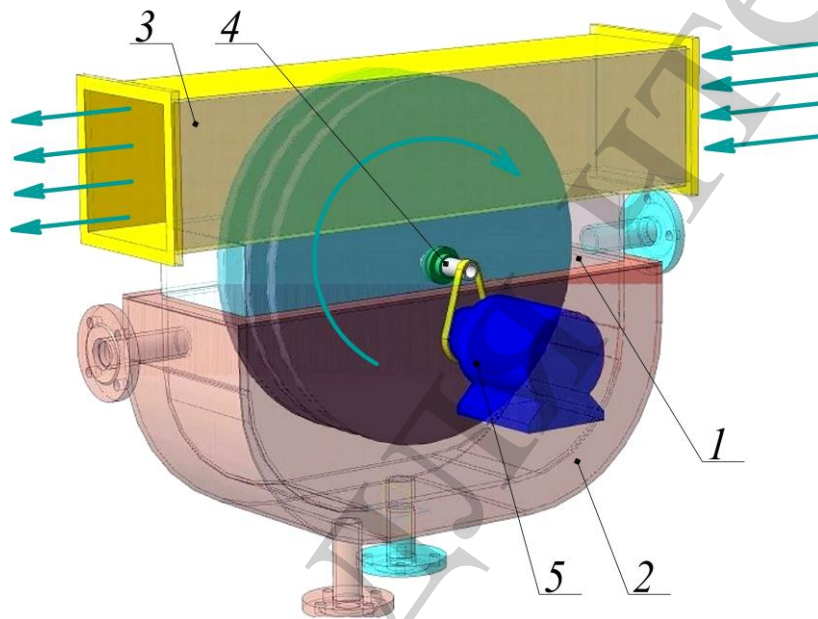


Рис. 2. Схема роторно-дискового плівкового випарного апарату:
1 – корпус, 2 – теплообмінна сорочка, 3 – канал газового теплоносія,
4 – вал з дисковими насадками, 5 – електропривод

Електропривод 5 РДПВА дозволяє змінювати швидкість обертання дискових насадок в діапазоні від 0,25 до 5 об/с [9]. При обертанні диски на своїй поверхні виносять рідину в зону контакту з теплоносієм, який продувається через канал 3 РДПВА. Частина вологи випаровується з поверхні і разом з теплоносієм виноситься із робочої зони апарату. Теплообмінна сорочка 2 виконує функцію термостатування, за рахунок підведення теплоносія для підтримання оптимальної температури концентрування. Слід зазначити, що важливим фактором під час концентрування термолабільних речовин, є швидкість зневоднення, тобто тривалість контакту з гріючим газовим теплоносієм. За рахунок обертання дискових насадок час контакту зводиться до мінімуму, при цьому з тонкого шару плівки встигає випаровуватись рідина і не відбувається пошкодження концентрату.

5. Результати комп'ютерного моделювання гідродинаміки роторно-дискового плівкового випарного апарата

Для детального визначення особливостей гідродинаміки та ефективності запропонованої конструкції, на платформі ANSYS Workbench була отримана фізична картина процесу з використанням реальних геометричних та фізичних параметрів експериментальної установки. Методика створення комп'ютерної математичної моделі полягає у використанні $k-\epsilon$ моделі турбулентності, побудові геометричних масивів, що відповідають об'єму робочих теплоносіїв, після чого створення сітки, шляхом розбиття на кінцеві елементи, встановленні параметрів на границях рідина-газ. У загальному випадку для моделювання використовувались наступні граничні параметри, які визначені як раціональні під час проведення натурних досліджень. Швидкість руху газового теплоносія 6 м/с, частота обертання дискової насадки – 1 об/с, діаметр дискової насадки – 0,2 м. Теплофізичні властивості газового теплоносія задавались для повітря при температурі 80 °С, теплофізичні властивості рідини, що концентруються задавались для 20 % водного розчину м'яса при температурі 40 °С [1, 9, 10].

Отримана модель гідродинаміки досить добре співставляється з натурними дослідженнями на реальному експериментальному стенді, що підтверджує її адекватність (рис. 3).

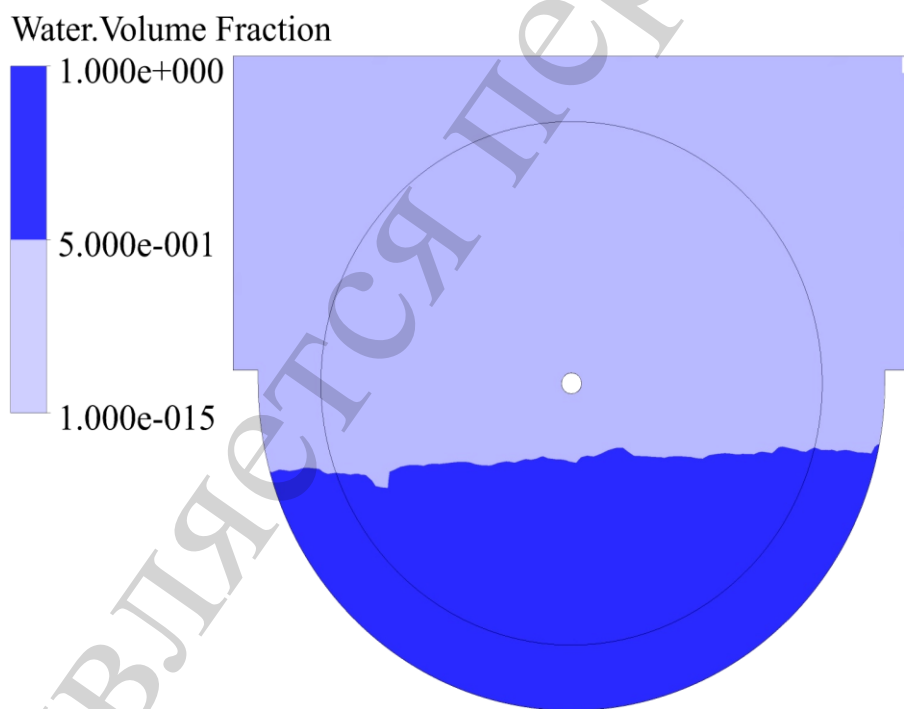


Рис. 3. Результат фізичного моделювання гідродинаміки в РДПВА

Аналіз отриманої моделі гідродинаміки дає можливість стверджувати, що інтенсивність потоку газового теплоносія напряму залежить від геометрії каналу РДПВА. Швидкість потоку суттєво зростає при проходженні каналу між дисковими насадками, при цьому її максимальне значення становить $w_{\max} =$

=8,176 м/с (рис. 4). Збільшення швидкості призводить до зміщення режиму течії газового теплоносія в сторону зростання числа Рейнольдса ($Re > 85000$).

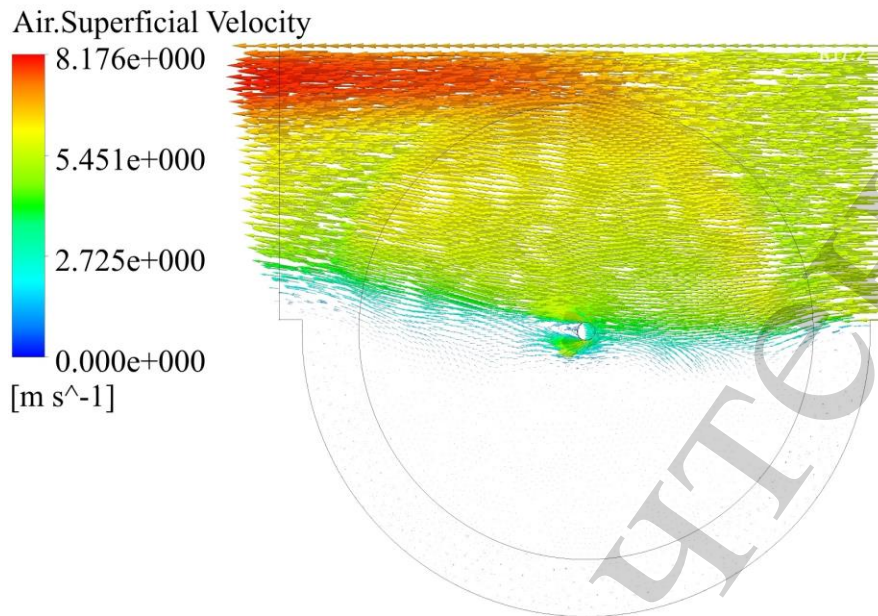


Рис. 4. Градієнт швидкості та траєкторія потоків газового теплоносія в РДПВА

Цей факт свідчить про значну турбулізацію потоку в зоні тепломасообмінних елементів, що позитивно впливає на значення коефіцієнта тепловіддачі з питомої поверхні теплообміну. Максимальне значення кінетичної енергії турбулентності становить $TKE_{max} = 8,985 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}^2$ (рис. 5), такий показник свідчить про інтенсивний тепломасообмін в зоні контакту газової фази і плівки рідини та прискорює її випаровування.

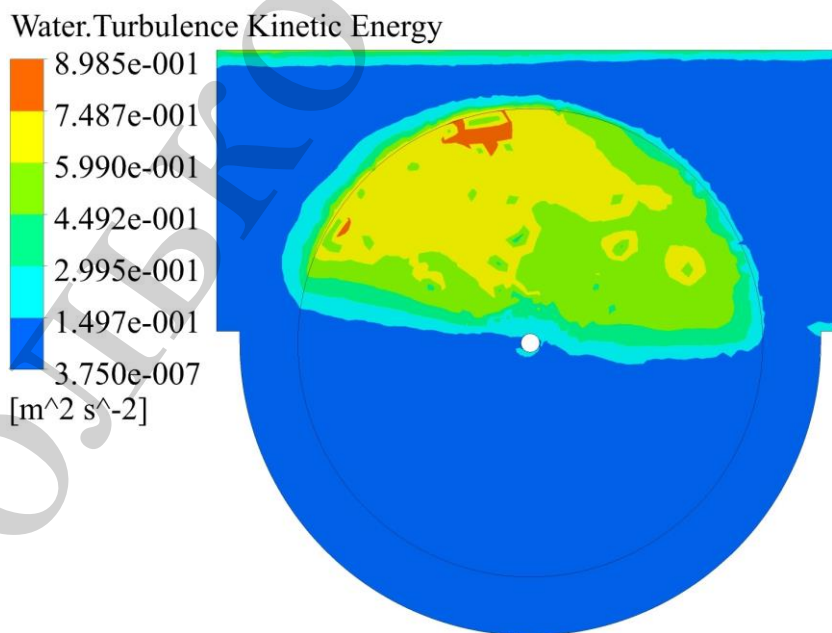


Рис. 5. Турбулізація потоків газового теплоносія в РДПВА

Не меш важливим є значення швидкості потоку рідкої фази, що підлягає концентруванню. З одного боку необхідно створити умови для гомогенізації розчину під час розчинення в ній зневодненої плівки рідини, а з іншого боку створити потоки рідини з низькими значеннями напружень зсуву, у разі концентрування біотехнологічних матеріалів.

Аналіз результатів моделювання показав, що максимальна швидкість потоку рідкої фази становить $w_{\max}=0,413$ м/с (рис. 6). При цьому траєкторія потоків, створювана дисковими насадками, свідчить про значне переміщення об'ємів рідини, що позитивно впливає на дифузійні процеси. Завдяки моделі гідродинаміки вдалось диференціювати потоки, що дало змогу встановити, що в об'ємі рідини переважають тангенціальні та радіальні потоки, при цьому менш вираженими є осьові потоки. Як відомо, добуток швидкості зсуву потоку на динамічну в'язкість рідини є величиною напруження зсуву. При концентруванні біотехнологічних матеріалів слід враховувати допустиме значення напруження зсуву відповідно до класифікації живого мікроорганізму. У випадку концентрування клітин еукаріотів, цей показник найменший і за літературними даними лежить в межах $\tau=10^1-10^2$ Па [18].

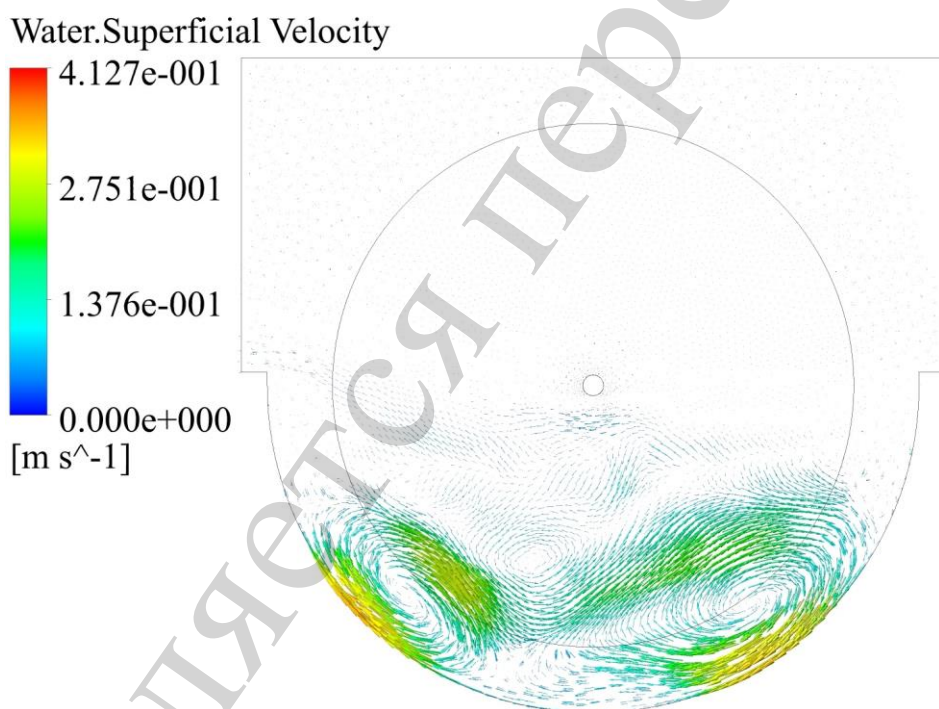


Рис. 6. Градієнт швидкості та траєкторія потоків рідини, що концентрується в РДПВА

Аналіз розподілу напружень зсуву поблизу поверхонь дискових насадок (вертикальні асимптоти) дає можливість зробити висновок, що при заданих оптимальних умовах проведення процесу максимальні значення напружень зсуву, вздовж поверхні дискової насадки, не перевищують $\tau=10^{-6}$ Па (рис. 7), тому використання РДПВА є раціональним при зневодненні клітинних культур.

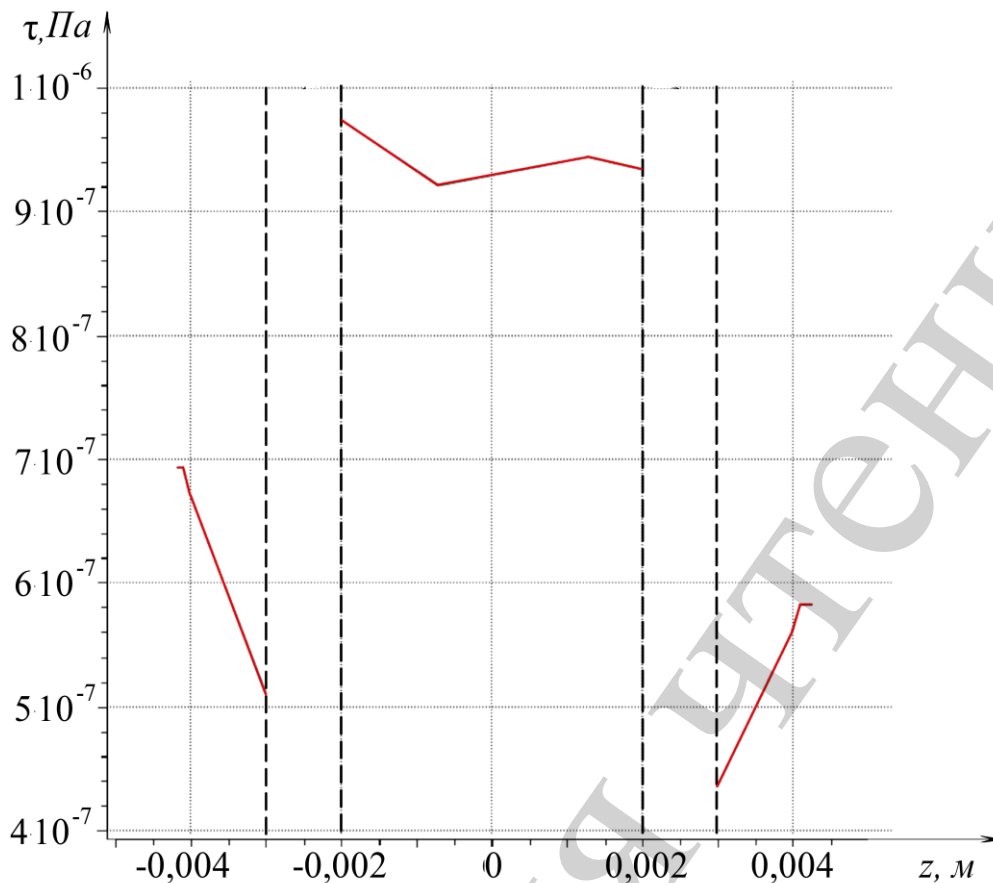


Рис. 7. Розподіл величини напруження зсуву τ вздовж координати z

Отримані результати дають змогу стверджувати, що запропонована конструкція дозволяє проводити концентрування в лабільних умовах, з урахуванням напружень зсуву і параметрів температур.

6. Обговорення результатів досліджень теплообмінного елемента

При визначенні ефективності використання даної схеми подачі повітря для концентрування термолабільних речовин в РДПВА доцільно використовувати епюру розподілу швидкостей повітря (рис. 1). Спостерігається рівномірний фронт руху газового теплоносія, без явно виражених зон застою та локальних максимумів. Дана епюра дає можливість встановлення раціональних параметрів швидкості потоку газової фази, при якій буде здійснюватися максимально інтенсивне випаровування, з одного боку, і не буде відбуватися зрив плівки рідини в газовий теплоносій (втрата продукту) з поверхні дискової насадки, з іншого. Середня швидкість між насадками становить $W_{cp}=6,814$ м/с. Встановлення адекватності побудованої комп'ютерної моделі відбувалося у порівнянні результатів величини швидкості газової фази на вході та виході з апарату, яку вдалося виміряти в ході експерименту [9]. Так, величина швидкості на вході в апарат при експериментальних дослідженнях $w_{max}=6$ м/с, а в робочій зоні за дисковими насадками $w_{max}=7,3$ м/с, в свою чергу модель в цій зоні показує результат: на вході в апарат $w_{max}=6$ м/с, робоча зона за дисковими насадками $w_{max}=7,42$ м/с.

При аналізі руху рідини по поверхні дискової насадки необхідно враховувати наступні фактори: сили інерції, які виникають внаслідок обертання диску, гравітаційну силу та силу тертя, яка виникає на границі поділу фаз газ-рідина. Через невисоку швидкість обертання диску інерційна складова сил набагато менше за дві іншу складові, тому для аналізу зриву плівки з поверхні диску може не враховуватись. В той же час, під дією гравітаційної сили тонкий шар плівки рідини рухається ламінарно, а внести збурення в її режим руху може лише набігаючий потік газового теплоносія. Фактором для оцінки турбулізації потоку газового теплоносія слугує кінетична енергія турбулентності.

При стендовому експерименті візуально було встановлено, що при швидкості 12 м/с, плівка майже повністю зривається з поверхні диску. Моделювання для швидкості 12 м/с дала можливість встановити максимальні значення $TKE_{\max}=3,094\text{ м}^2/\text{с}^2$, яке може бути використано для встановлення раціональних параметрів швидкості, при яких не відбувається локальних зривів потоку. У випадку швидкості руху повітря 6 м/с максимальне значення знижується до $TKE_{\max}=8,985 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}^2$ (рис. 5).

При концентруванні продуктів біотехнологічного синтезу виникає необхідність унеможливити осідання клітин на поверхнях обладнання, для забезпечення рівномірності протікання процесу та зменшення втрат продукту. В РДПВА таким «слабким» місцем може бути нижня частина корпусу, в якій знаходиться рідина, що направляє на концентрування. Отримати дані про рух рідини між дисками в нижній частині експериментальним шляхом неймовірно складно, через дороговизну відповідного обладнання для вимірювання параметрів та складність його встановлення в обмежений простір між дисками. З іншого боку така задача може бути вирішена з використанням комп'ютерного або математичного моделювання. Як видно з рис. 6, під час обертання дисків в рідині утворюються два циркуляційних контури, з права та з ліва від поперечної осі апарата. Напрямок руху рідини в нижній частині іде від центру, де швидкість потоку ледве перевищує 0,05 м/с, прискорюється до швидкості 0,39 м/с в обидва боки, та, по мірі наближення до вільної поверхні, закручується, змінюючи напрям на протилежний, і знову повертає рідину до центру. При такому русі біля дна зменшується вірогідність виникнення застійних зон. Це забезпечує рівномірність переміщення шарів рідини і ускладнить осідання клітин на стінки апарату, при концентруванні культуральної рідини.

Ще одним чинником, що впливає на якість готового продукту, є пошкодження живих клітин напруженнями зсуву, які виникають внаслідок різних швидкостей середовища на різних сторонах клітинної стінки. Літературні дані вказують, що для клітин еукаріотів величина таких напружень не повинна перевищувати 10^2 Па [18]. При проведенні досліджень було встановлено, що найбільших значень напруження зсуву досягає між дисками (рис. 7). Середнє значення в цій зоні становить $0,94 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$, а максимальне $0,98 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$. На зовнішніх сторонах крайніх дисків величина напружень зменшується в середньому на 30 %, і складає від $0,44 \cdot 10^{-6}$ до $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$. Найнебезпечнішими зонами, з точки зору пошкодження клітин, є перехід від рідини, яка налипає на поверхню диска, до рідини у вільному об'ємі. Порівняння напружень зсуву, що виникають в

РДПВА, з максимально допустимими вказує на можливість застосування такого типу апарату для концентрування продуктів біотехнологічного походження.

Загальний аналіз результатів дає можливість стверджувати, що комп'ютерна модель адекватно описує гідродинаміку РДПВА. Порівняння проводилось по товщині плівки рідини, отриманої в результаті математичного моделювання з моделюванням в середовищі ANSYS (розбіжність між результатами не перевищує 5 %).

Для конструкції РДПВА залишається відкритим питання стосовно моделювання масообміну в системі газ-рідина (випаровування з плівки), якому можуть бути присвячені майбутні дослідження.

7. Висновки

1. Розроблено комп'ютерну модель гідродинаміки, з урахуванням всіх конструкційних особливостей, яка дає можливість адекватно оцінювати ефективність використання роторно-дискового плівкового випарного апарату для концентрування термолабільних матеріалів. Отримано оптимальні параметри швидкості газової фази ($w_{\max}=8,176$ м/с), при яких не відбувається зриву і уносу плівки рідини з поверхні диску, але зберігається максимальна швидкість оновлення параметрів газової фази біля поверхні масообміну. Визначено, що при швидкості обертання диску 1 с^{-1} в рідині створюються два циркуляційних контури, які зменшують можливість осідання часток на стінках апарату, при максимальному значенні швидкості рідини $w_{\max}=0,413$ м/с. В рідині вдалось диференціювати потоки на радіальні та тангенціальні, з незначною осьовою складовою.

2. Встановлено, що при переміщенні дисків в рідкій фазі виникають напруження зсуву з максимальним значенням $0,98 \cdot 10^{-6}$ Па. Порівняння отриманих даних з максимально допустимими, які становлять 10^2 Па, при яких не відбувається руйнування клітинних структур, доводять можливість використання РДПВА для концентрування термолабільних матеріалів біотехнологічного синтезу. Можливість отримання оптимальних параметрів проходження процесу за допомогою комп'ютерного моделювання забезпечує впровадження РДПВА у існуючу виробничу лінію з мінімальними затратами ресурсів.

Література

1. Костик С., Ободович А. Н. Исследование технических и теплофизических характеристик универсального сушильного стенда по обезвоживанию термолабильных материалов // Молодой ученый. 2014. № 4. С. 195–198.
2. Сороковая Н. Н., Снежкин Ю. Ф., Шапарь Р. А., Сороковой Р. Я. Способ сушки термолабильных материалов в ленточной сушильной установке с применением теплового насоса // Наукові праці ОНАХТ. 2015. Т. 2, № 47. С. 91–97.
3. Safin R. R., Khakimzyanov I. F., Mukhametzyanov S. R. Non-volatile Facility for Vacuum Drying of Thermolabile Materials // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1063–1068. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.595>
4. Low temperature fused deposition modeling (FDM) 3D printing of thermolabile drugs / Kollamaram G., Croker D. M., Walker G. M., Goyanes A., Ba-

sit A. W., Gaisford S. // International Journal of Pharmaceutics. 2018. Vol. 545, Issue 1-2. P. 144–152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.04.055>

5. Ultrasound-assisted vacuum drying of nectarine / Souza da Silva E., Rupert Brandão S. C., Lopes da Silva A., Fernandes da Silva J. H., Duarte Coêlho A. C., Azoubel P. M. // Journal of Food Engineering. 2019. Vol. 246. P. 119–124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.11.013>

6. Luo X., Yang Z. A new approach for estimation of total heat exchange factor in reheating furnace by solving an inverse heat conduction problem // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 112. P. 1062–1071. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.009>

7. Assessment of RANS turbulence models for numerical study of laminar-turbulent transition in convection heat transfer / Abdollahzadeh M., Esmaeilpour M., Vizinho R., Younesi A., Páscoa J. C. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115. P. 1288–1308. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.114>

8. Zhang C., Li Y. Thermodynamic analysis on theoretical models of cycle combined heat exchange process: The reversible heat exchange process // Energy. 2017. Vol. 124. P. 565–578. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.103>

9. Особливості тепловіддачі при вимушеній конвекції в роторно-дисковому плівковому випарному апараті / Ободович О. М., Ружинська Л. І., Костик С. І., Булах Н. М. // Промышленная теплотехника. 2016. Т. 37, № 6. С. 22–28.

10. Ободович А. Н., Ружинская Л. И., Костик С. И. Математическое моделирование процесса образования пограничного слоя на поверхности вращающегося диска, частично погруженного в культуральную жидкость и обдуваемого газовым теплоносителем // Промышленная теплотехника. 2014. Т. 36, № 2. С. 86–92.

11. Experimental investigation of convective heat transfer from sewage in heat exchange pipes and the construction of a fouling resistance-based mathematical model / Song J., Liu Z., Ma Z., Zhang J. // Energy and Buildings. 2017. Vol. 150. P. 412–420. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.025>

12. Heat Exchange Numerical Modeling of a Submarine Pipeline for Crude Oil Transport / Lanzafame R., Mauro S., Messina M., Brusca S. // Energy Procedia. 2017. Vol. 126. P. 18–25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.048>

13. Influence of various aspects of low Reynolds number $k - \epsilon$ turbulence models on predicting in-tube buoyancy affected heat transfer to supercritical pressure fluids / Zhao C.-R., Zhang Z., Jiang P.-X., Bo H.-L. // Nuclear Engineering and Design. 2017. Vol. 313. P. 401–413. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.12.033>

14. Jafari M., Farhadi M., Sedighi K. Thermal performance enhancement in a heat exchanging tube via a four-lobe swirl generator: An experimental and numerical approach // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 124. P. 883–896. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.095>

15. Шибецький В. Ю., Семенюк С. М., Костик С. І. Розробка конструкції та моделювання гідродинаміки в біореакторі з поверхневим

культивуванням клітинних культур // ScienceRise. 2017. № 7 (36). С. 53–59. doi: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.107176>

16. Гідродинаміка ферментеру з багатоваловою мішалкою / Закоморний Д. М., Кутовий М. Г., Костик С. І., Поводзинський В. М., Шибецький В. Ю. // ScienceRise. 2016. Т. 5, № 2 (22). С. 65–70. doi: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.69451>

17. Математичне моделювання гідродинаміки перемішуючого пристрою з магнітним приводом / Костик С. І., Ружинська Л. І., Шибецький В. Ю., Ревтов О. О. // ScienceRise. 2016. Т. 4, № 2 (21). С. 27–31. doi: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.67275>

18. Cell Membranes Resist Flow / Shi Z., Graber Z. T., Baumgart T., Stone H. A., Cohen A. E. // Cell. 2018. Vol. 175, Issue 7. P. 1769–1779.e13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.09.054>

Тільки для читання