

УДК 663.1

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.186654

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ ПРИ РОБОТІ ТРИЯРУСНОЇ ЗАКРИТОЇ ТУРБІННОЇ МІШАЛКИ

Яремчук М. М., Костик С. І., Шибецький В. Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОМОГЕНИЗАЦИИ ПРИ РАБОТЕ ТРЕХЪЯРУСНОЙ ЗАКРЫТОЙ ТУРБИННОЙ МЕШАЛКИ

Яремчук М. М., Костик С. И., Шибецкий В. Ю.

RESEARCH OF THE HOMOGENIZATION PROCESS IN THE OPERATION OF A THREE-LEVEL CLOSED TURBINE MIXER

Yaremchuk M., Kostyk S., Shybetskyu V.

Об'єктом дослідження є триярусна турбінна мішалка закритого типу, розроблена та виготовлена у натуральному розмірі за допомогою 3D принтера.

Одним з найбільш проблемних місць процесу ферментації у біореакторі є гомогенізація середовища. Під час процесу перемішування у більшості ферментерів утворюються застійні зони, у цих зонах середовище є неоднорідним, гірше прогрівається, отримує недостатню кількість повітря (якщо середовище аеробне) та спричиняє відмирання мікроорганізмів, що культивуються. Таким чином, кінцевий продукт не на 100 % однакової структури, а відповідно, і якості, що для фармацевтичної продукції є критичним.

В ході дослідження використовувалися 2 різні методи, що були покликані підтвердити або спростувати один одного, а саме: метод комп'ютерного моделювання та метод експерименту. Експеримент полягав у виготовленні розробленої моделі мішалки та проведенні процесу перемішування з її використанням. Перемішування проводилось на різних швидкостях, з різними типами мішалок та з використанням контрастного трассера для візуалізації виду потоків, що утворились. Графічне моделювання полягало у створенні аналогічної до експериментальної моделі мішалки та проведенні графічного моделювання у блоці CFX програми ANSYS. Цей метод дав змогу під різними кутами побачити створені потоки, знайти найбільш динамічні зони та зсередини дослідити фізику процесу.

Отримано результат, який показує, що триярусна закрыта турбінна мішалка показує кращі результати по швидкості гомогенізації, ніж типова закрыта турбіна. Це пов'язано з тим, що запропоноване рішення має ряд особливостей, зокрема порожнисту структуру вала.

Запропоновані розрахункові моделі в ANSYS дозволили отримати поля швидкостей та встановити величину і напрямки векторів швидкості.

Подібна методика оцінки ефективності гомогенізації може бути використана при проектуванні нових конструкцій механічних перемішувачів пристроїв.

Ключові слова: *культивування мікроорганізмів в біореакторі, гомогенізуючі пристрої, закрыта турбінна мішалка, гідродинаміка потоків.*

Объектом исследования является трехъярусная турбинная мешалка закрытого типа, разработана и изготовленная в натуральную величину с помощью 3D принтера.

Одним из самых проблемных мест процесса ферментации в биореакторе является гомогенизация среды. В процессе перемешивания в большинстве ферментеров образуются застойные зоны, в этих зонах среда является неоднородной, хуже прогревается, получает недостаточное количество воздуха (если среда аэробная) и вызывает отмирание культивируемых микроорганизмов. Таким образом, конечный продукт не на 100 % одинаковой структуры, а соответственно, и качества, что для фармацевтической продукции является критическим.

В ходе исследования использовались 2 различных метода, которые были призваны подтвердить или опровергнуть друг друга, а именно: метод компьютерного моделирования и метод эксперимента. Эксперимент заключался в изготовлении разработанной модели мешалки и проведении процесса перемешивания с ее использованием. Перемешивания проводились на различных скоростях, с различными типами мешалок и с использованием контрастного трассеры для визуализации вида образовавшихся потоков. Графическое моделирование состояло в создании аналогичной экспериментальной модели мешалки и проведении графического моделирования в блоке CFX программы ANSYS. Этот метод позволил под разными углами увидеть созданные потоки, найти наиболее динамичные зоны и изнутри исследовать физику процесса.

Получен результат, который показывает, что трехъярусная закрытая турбинная мешалка показывает лучшие результаты по скорости гомогенизации, чем типичная закрытая турбина. Это связано с тем, что предлагаемое решение имеет ряд особенностей, в частности ячеистую структуру вала.

Предложенные расчетные модели в ANSYS позволили получить поля скоростей и установить величину и направление векторов скорости.

Подобная методика оценки эффективности гомогенизации может быть использована при проектировании новых конструкций механических перемешивающих устройств.

Ключевые слова: *культивирование микроорганизмов в биореакторе, гомогенизирующие устройства, закрытая турбинная мешалка, гидродинамика потоков.*

1. Вступ

До основних фізичних процесів, що відбуваються під час культивування мікроорганізмів в біореакторі відносять гідродинаміку, теплообмін і масообмін [1]. Для встановлення оптимальних параметрів культивування необхідно

враховувати особливості цих процесів з певними обмеженнями. До основних лімітуючих параметрів культивування відносять: рівень рН, градієнт температур, концентрація поживних речовин і метаболітів, напруження зсуву в рідині та умови асептики. Для забезпечення оптимальних умов культивування сучасні біореактори обладнані гомогенізуючими пристроями для введення енергії в рідину, які умовно поділяють на гідравлічні, пневматичні і механічні. Правильний підбір механічного перемішуючого пристрою є запорукою ефективної роботи біореактора. Швидкість гомогенізації рідкого культурального середовища напряму залежить, як від фізичних властивостей самої рідини, так і від розподілу векторів швидкості по робочому об'єму, що створюються мішалкою [2–4]. Наразі існує велика кількість різноманітних конструкцій механічних перемішуючих пристроїв, однак кожна з них володіє як перевагами, так і недоліками. Тому створення нових конструкцій, які дозволять ефективно і швидко проводити процес гомогенізації є актуальною задачею. Дане дослідження присвячене вивченню гідродинаміки при роботі закритої турбінної мішалки спеціальної конструкції. Таким чином, *об'єктом дослідження* є гідродинаміка потоків при роботі тріярусної турбінної мішалки. *А метою дослідження* є моделювання процесу перемішування в середовищі ANSYS та порівняння його з реальним експериментом. Вивчення особливостей гідродинаміки під час роботи мішалки запропонованої конструкції дасть можливість встановити оптимальні параметри і оцінити можливість використання таких перемішуючих пристроїв в масообмінних апаратах [5].

2. Методика проведення досліджень

2.1. Моделювання гідродинаміки тріярусної закритої турбінної мішалки запропонованої конструкції в середовищі ANSYS

Опираючись на досвід роботи з механічними перемішуючими пристроями [6, 7] та виходячи з інженерних міркувань, була запропонована конструкція тріярусної закритої турбінної мішалки, яка була побудована в середовищі SolidWorks (рис. 1).

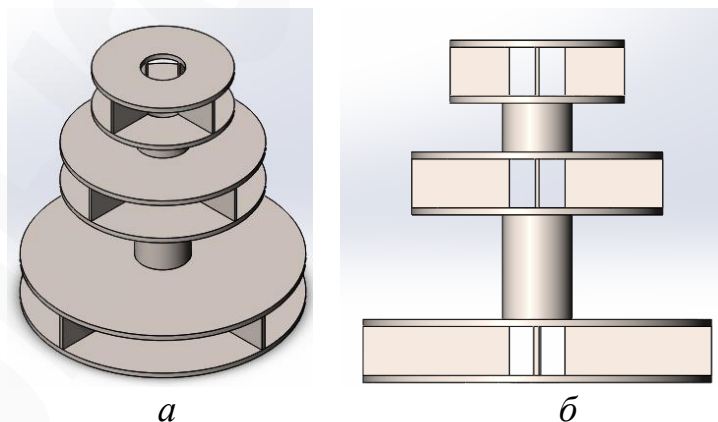


Рис. 1. Конструкція тріярусної закритої турбінної мішалки:
а – загальний вигляд; *б* – вигляд спереду

Використовуючи методику моделювання гідродинаміки, що основана на використанні методу кінцевих елементів з використанням $k-\varepsilon$ моделі турбулентності, було проведено моделювання в пакеті ANSYS в модулі CFX [4]. Частота обертів мішалки – 3 об/с.

2.2. Методика експерименту по встановленню ефективності гомогенізації при перемішуванні триярусною закритою турбінною мішалкою

Для перевірки ефективності гомогенізації та візуалізації потоків, що виникають під час роботи запропонованої конструкції триярусної турбіни було надруковано її на 3D принтері. Всі габаритні розміри відповідають тим, що були використані під час моделювання. Для встановлення швидкості гомогенізації використовувався метод вирівнювання концентрацій по всьому об'єму [8]. Для цього в модельну рідину, яка підлягає перемішуванню додавали 1 мл оцтової кислоти, при цьому постійно проводиться контроль рівня рН. Як відомо [9], у води він близький до нейтрального значення $\text{pH}=7$, під час додавання кислоти рівень рН розчину зміщується в сторону менших значень (кислотне середовище). Зрозуміло, що після додавання декількох крапель кислоти до об'єму води вирівнювання рН відбувається не моментально, оскільки необхідно, щоб відбулися дифузійні процеси. Час, за який відбудеться встановлення нового рівня рН, буде залежати від конструкції і режиму роботи перемішуючого пристрою. Порівнявши час гомогенізації різних типів мішалок, можна стверджувати про їх ефективність роботи.

Для візуалізації потоків використовується метод із додаванням кольорового трассера, що поступово забарвлює рідину відповідно за лініями потоку.

3. Результати дослідження та їх обговорення

3.1. Моделювання гідродинаміки при роботі мішалки

Аналіз одержаних результатів дає змогу спостерігати розподілення полів швидкостей в осьовому, тангенційному та радіальному напрямках. Максимальна швидкість потоків рідини спостерігається безпосередньо поблизу лопатей закритої турбіни і становить 0,477 м/с (рис. 2). Модуль швидкості за напрямком вектора найбільший в радіальному напрямі, і суттєво менший в осьовому і дотичному напрямках (рис. 3). Однак слід зазначити, що внаслідок високих радіальних швидкостей всередині турбіни утворюється падіння тиску, що спричиняє виникненню ефекту ежекції. Внаслідок чого, мішалка всмоктує в себе потоки рідини в осьовому напрямку, при цьому відбувається перерозподіл векторів швидкості по всьому робочому об'єму (рис. 4).

Встановлено, що описане явище значно посилюється за рахунок встановлення декількох ярусів, що позитивно характеризує дану конструкцію. Основною властивістю можна вважати саме створення підйомної сили, що може бути корисним при перемішуванні дисперсних систем, таких як суспензії.

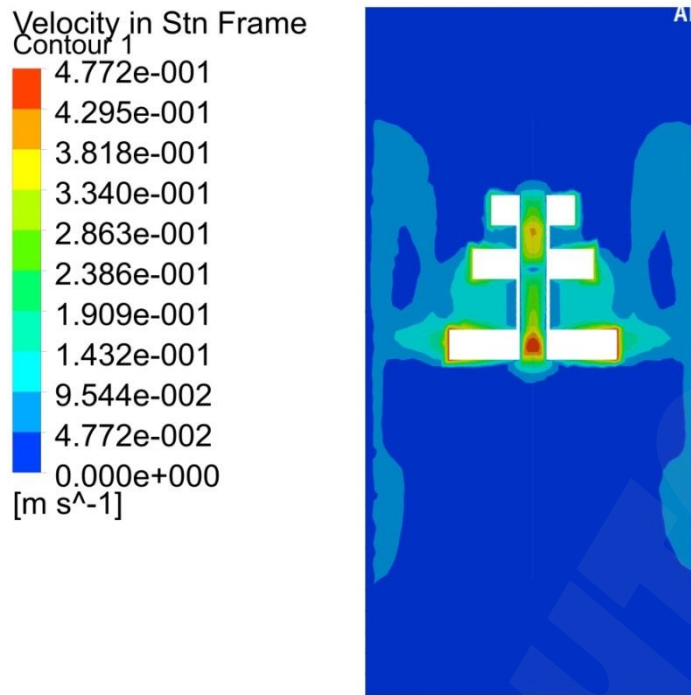


Рис. 2. Поля швидкостей триярусної закритої турбінної мішалки, отримані в середовищі ANSYS

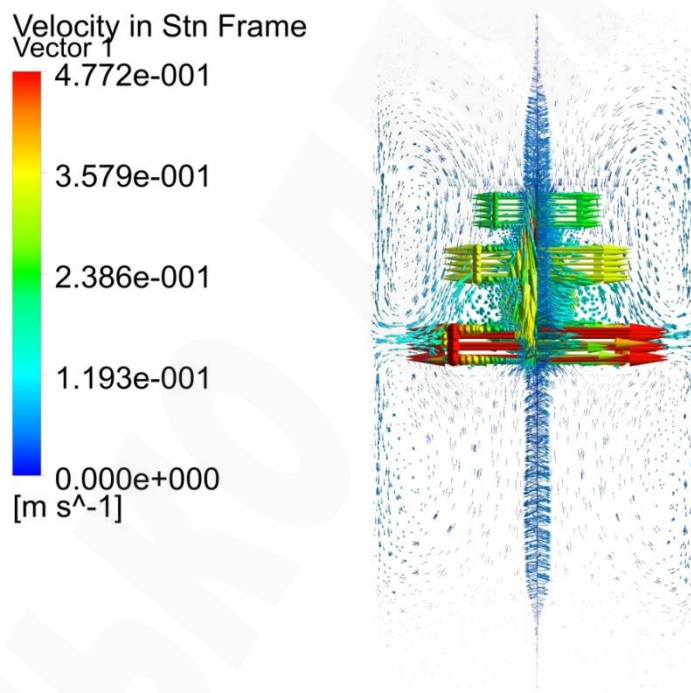


Рис. 3. Модуль вектора швидкостей триярусної закритої турбінної мішалки, отримані в середовищі ANSYS

Виявлена особливість саме для конструкції триярусної мішалки дозволяє стверджувати, що активна робоча зона має умовно конусоподібну форму і займає значно більший об'єм в порівнянні з типовими одноярусними конструкціями (рис. 4).

Окремо слід зазначити, що була отримана картина напружень зсуву в рідині, які необхідно враховувати під час культивування. Оскільки високотурбулентні зони потоку можуть пошкоджувати живі мікроорганізми. Однак величина цих напружень найбільша в пограничному шарі мішалки поблизу лопатей турбіни і лежить в допустимих межах.

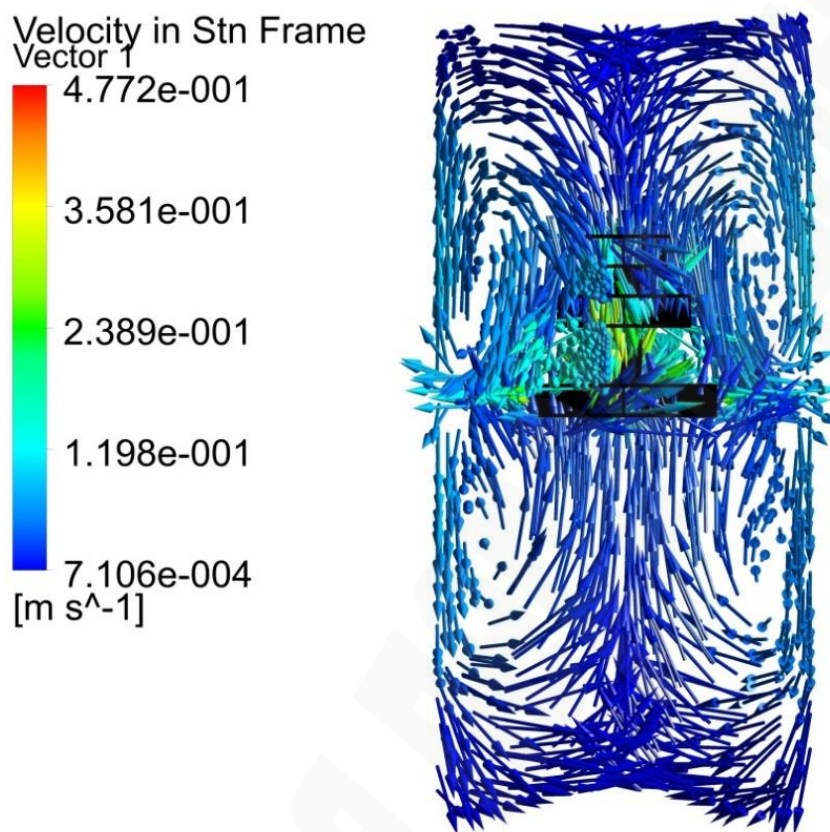


Рис. 4. Вектори швидкостей триярусної закритої турбінної мішалки отримані в середовищі ANSYS

3.2. Експериментальні дослідження при роботі мішалки

В результаті проведених досліджень по встановленню ефективності перемішування за методикою описаною в пункті 2.2., було встановлено, що запропонована конструкція показує кращі результати за звичайну типову конструкцію закритої турбіни. Експериментальна установка показана на (рис. 5). Швидкість вирівнювання концентрацій по об'єму для триярусної закритої турбінної мішалки склала 8 секунд, при цьому типова конструкція показала час в 11 секунд.

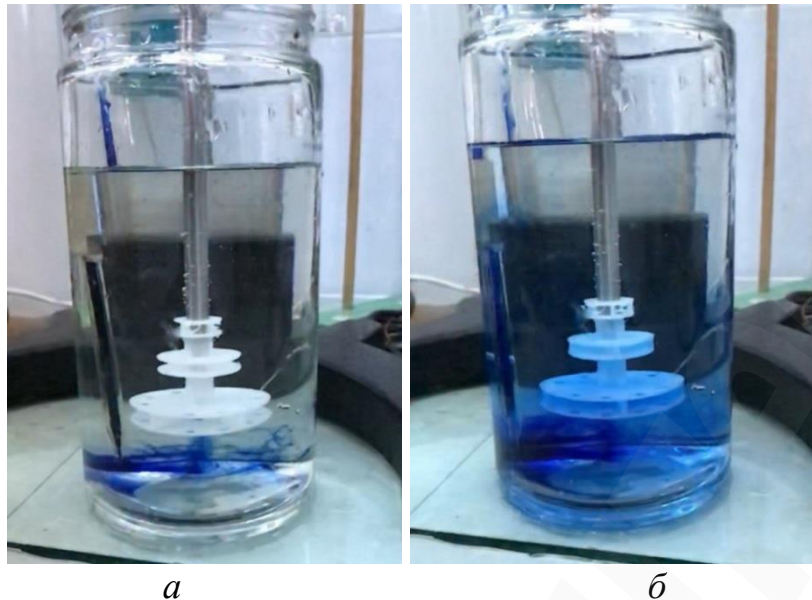


Рис. 5. Візуалізація потоків рідини за допомогою кольорового трасера:
 а – початок перемішування; б – активна фаза перемішування

Для встановлення достовірності та адекватності запропонованих розрахункових моделей в середовищі ANSYS була проведена візуалізація потоків, що утворюється під час роботи мішалки. В результаті було виявлено, що радіальна складова швидкості та ежекційний ефект мають чітко виражений характер, що повністю співставляється із результатами, одержаними під час моделювання [10].

4. Висновки

Встановлено, що триярусна закрита турбінна мішалка показує кращі результати по швидкості гомогенізації, ніж типова закрита турбіна.

Запропоновані розрахункові моделі в ANSYS дозволили отримати поля швидкостей та встановити величину і напрямок векторів швидкості.

Подібна методика оцінки ефективності гомогенізації може бути використана при проектуванні нових конструкцій механічних перемішувачів.

Література

1. Kafarov, V. V., Vinarov, A. Iu., Gordeev, L. S. (1979). *Modelirovanie bioximicheskix reaktorov*. Moscow: Lesnaia promyshlennost, 344.
2. Barabash, V. M., Begichev, V. I., Belevickaia, M. A., Smirnov, N. N. (2007). Problemy i tendencii razvitiia teorii i praktiki peremeshivaniia zhidkikh sred. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*, 41 (2), 140–147.
3. Kostyk, S. I., Ruzhynska, L. I., Shybetskyi, V. Yu., Revtov, O. O. (2016). Mathematical simulation of hydrodynamics of the mixing device with magnetic drive. *ScienceRise*, 4 (2 (21)), 27–31. doi: <http://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.67275>
4. Ruzhynska, L. I., Povodzynskyi, V. N., Cherednyk, Ye. M., Morozova, Ye. V. (2013). Mathematical modeling of mixing atcultivation of biological agents sensitive to transverse strain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (4 (61)), 27–30. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/9148>

5. Viestur, U. E. (1972). *Aeraciia i peremeshivanie v processakh kultivirovaniia mikroorganizmov*. Moscow, 54–67.
6. Shybetskiy, V., Semeniuk, S., Kostyk, S. (2017). Design of construction and hydrodynamic modeling in a roller bioreactor with surface cultivation of cell cultures. *ScienceRise*, 7 (36), 53–59. doi: <http://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.107176>
7. Zakomorny, D. M., Kutovyi, M. H., Kostyk, S. I., Povodzynskyi, V. M., Shybetskiy, V. Yu. (2016). Hydrodynamics of fermenter with multi-shaft stirrer. *ScienceRise*, 5 (2 (22)), 65–70. doi: <http://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.69451>
8. Viestur, U. E., Kuznecov, A. M., Savenkov, V. V. (1988). *Sistemy fermentacii Viestur*. Riga: Zinatne, 368.
9. Lure, Iu. Iu. (1975). *Spravochnik po analiticheskoi khimii*. Moscow: Khimiia, 488.
10. *Rukovodiaschii dokument RD 26.260.008-92. Fermentatory dlia proizvodstv mikrobiologicheskogo sinteza. Metodiki rascheta osnovnykh konstruktivnykh elementov i rezhimov raboty* (1993). Izdanie oficialnoe.

The object of research is a three-level turbine mixer of the closed type, designed and manufactured in full size using a 3D printer.

One of the most problematic places of the fermentation process in a bioreactor is the homogenization of the medium. During mixing, stagnant zones form in most fermenters, in these zones the medium is heterogeneous, warms up worse, receives insufficient air (if the medium is aerobic) and causes the death of cultivated microorganisms. Thus, the final product is not 100 % of the same structure, and, accordingly, quality, which is critical for pharmaceutical products.

In the course of the study, 2 different methods were used, which were designed to confirm or refute each other, namely: the computer simulation method and the experimental method. The experiment consists in manufacturing the developed mixer model and carrying out the mixing process with its use. Mixing is carried out at different velocities, with different types of mixers and using a contrast tracer to visualize the type of formed streams. Graphical modeling consisted of creating a similar experimental model of the mixer and carrying out graphical modeling in the CFX block of the ANSYS program. This method makes it possible to see the created flows from different angles, find the most dynamic zones and study the physics of the process from the inside.

The obtained result shows that a three-level closed turbine mixer shows better homogenization speed results than a typical closed turbine. This is due to the fact that the proposed solution has a number of features, in particular, the cellular structure of the shaft. The proposed computational models in ANSYS make it possible to obtain velocity fields and establish the magnitude and direction of velocity vectors.

A similar technique for evaluating the effectiveness of homogenization can be used in the design of new designs of mechanical mixing devices.

Keywords: *cultivation of microorganisms in a bioreactor, homogenizing device, closed turbine mixer, flow hydrodynamics.*