

УДК 532.529:663.14. 033:663.143.2

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОЩУВАННЯ ДРІЖДЖІВ ШЛЯХОМ
ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ОБРОБЛЕННЯ КУЛЬТУРАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ**Ободович О. М.**¹, д.т.н., с.н.с., зав. відділом
<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>**Сидоренко В. В.**¹, к.т.н., с.н.с.,
<https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>**Шейко Т. В.**², к.т.н., учений секретар,
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>¹Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна²Інститут продовольчих ресурсів НААН, Київ, Україна<https://doi.org/10.31073/foodresources2022-19-13>

Предмет дослідження. Вирішення проблеми забезпечення клітин дріжджів достатньою кількістю розчиненого кисню для активації росту і розмноження протягом усього періоду культивування. **Мета.** Дослідження інтенсифікації процесу аерації культуральних середовищ методом дискретно-імпульсного введення енергії, який реалізується в роторно-пульсаційному апараті. **Методи.** Досліджено процес аерації культуральних середовищ в технології вирощування дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* методом дискретно-імпульсного введення енергії. Швидкість абсорбції кисню в культуральній рідині визначали за кількістю біомаси дріжджів, вирощених за період культивування. **Результати.** В процесі експериментів з культивування дріжджів на м'ясних розчинах визначена залежність швидкості масопереносу кисню від кутової швидкості обертання роторного вузла в культуральних середовищах із вмістом сухих речовин 3-10%. Зі зменшенням вмісту сухих речовин від 10 до 5% при обробці з кутовою швидкістю 48 об/с, швидкість абсорбції кисню культуральної рідини збільшується в 1,9 раза. Зі збільшенням частоти пульсацій від 2 до 3,85 кГц, масоперенесення зростає від 5 до 7,3 г/л·год за вмісту сухих речовин – 3% і від 2 до 4 г/л·год при вмісті сухих речовин – 10%. Подальше підвищення частоти пульсацій призводить до інактивації частини дріжджових клітин. Встановлено також, що діапазон оптимальних значень швидкості зсуву потоку становить 90-100·10³с⁻¹. Застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії в абсорбційних технологіях дозволяє значно інтенсифікувати масообмінні процеси. **Сфера застосування результатів.** Киснєве насичення мікроорганізмів можна застосовуватися для вирощування біомаси дріжджів для хлібопекарської та спиртової промисловості.

Ключові слова: дискретно-імпульсне введення енергії, масоперенос, абсорбція, мікроорганізми, культивування, інтенсифікація, поживні середовища

INTENSIFICATION OF THE YEAST GROWING PROCESS
BY DISCRETE-IMPULSE PROCESSING OF CULTURAL MEDIA**Olexandr Obodovych**¹, D-r of Sc., Engineering, Senior Researcher, Head of Department,
<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>**Vitalii Sydorenko**¹, Ph.D., Engineering, Senior Researcher,
<https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>**Tamila Sheiko**², Ph.D., Engineering, Scientific Secretary
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine²Institute of Food Resources of the NAAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine<https://doi.org/10.31073/foodresources2022-19-13>

Subject of research. Solving the problem of providing yeast cells with a sufficient amount of dissolved oxygen to activate growth and reproduction throughout the entire cultivation period. **Purpose.** The intensification of the process of aeration of cultural environments by the method of discrete-pulse energy input, implemented in a rotor-pulsation apparatus. **Methods.** The process of aeration of culture media in the technology of growing *Saccharomyces cerevisiae* yeast by the method of discrete-pulse

energy input was studied. The rate of oxygen absorption in the culture liquid was determined by the amount of yeast biomass grown during the cultivation period. **Results.** In the course of experiments on the cultivation of yeast on molasses solutions, the dependence of the oxygen mass transfer rate on the angular speed of rotation of the rotor unit in culture media with a dry solid content of 3-10% was determined. With a decrease in the content of solid content from 10 to 5% when processing with an angular speed of 48 rpm, the oxygen absorption rate of the culture liquid increases by 1.9 times. With an increase in the frequency of pulsations from 2 to 3.85 kHz, mass transfer increases from 5 to 7.3 g/l·h at solid content of 3% and from 2 to 4 g/h at solid content of 10%. A further increase in the frequency of pulsations leads to the inactivation of part of the yeast cells. It was also found that the optimal values of the shear rate of the flow is $90-100 \cdot 10^3 s^{-1}$. Application of the method of discrete-pulse energy input in absorption technologies makes it possible to significantly intensify mass exchange processes. **Scope of research results.** Oxygen saturation of microorganisms can be used to grow yeast biomass for the bakery and alcohol industries.

Key words: discrete-pulse input of energy, mass transfer, absorption, microorganisms, cultivation, intensification, cultural media

Розчинення слаботорозчинних газів у технологічних рідинах є важливим процесом на підприємствах харчової промисловості. Так, процес окислення технологічної води киснем, що міститься в повітрі під час очищення води в спиртовій, пивоварній та інших галузях промисловості, дозволяє видалити з води такі небажані домішки, як залізо, марганець, сірководень. Очищення стічних вод спиртової та пивоварної промисловості, які викликають біологічне забруднення, також відбувається в результаті хімічного і біологічного їх окислення. Аерація культуральних середовищ використовується в біологічних виробництвах в процесі культивування аеробних мікроорганізмів. Кисневе дихання організмів, будучи на порядок більш енергетично вигідним, ніж спиртове бродіння, знаходиться в основі процесу вирощування біомаси дріжджів для хлібопекарської, спиртової промисловості, у пивоварінні та ін. [1].

Постановка проблеми. Основна проблема, яку необхідно вирішити в процесі вирощування дріжджів, це забезпечення достатньої кількості клітин розчиненим киснем протягом усього періоду культивування. Низька рівноважна концентрація розчиненого кисню у воді і поживних середовищах при оптимальній температурі процесу (30 °C) з високою швидкістю споживання кисню клітинами дріжджів викликає постійну потребу в додатковій подачі кисню повітря в культуральне середовище.

Питанню процесу аерації культуральних середовищ приділяється пильна увага науковим співтовариством. Основна увага приділяється двом аспектам – вивченню впливу аерації на зростання або вироблення цільових метаболітів мікроорганізмами і способам зміни масообмінних характеристик роботи аеруючих пристроїв [2-4].

Витрата повітря, що проходить через культуральну рідину в барботажних апаратах, що в основному використовуються для процесу вирощування дріжджів, може бути дуже значною. Це пов'язано з тим, що утворювані в ході барботажу бульбашки повітря швидко коалесцують, істотно скорочуючи поверхню контакту фаз. Крім того, умови перебігу процесу аерації такі, що дріжджова маса нерівномірно розподілена за обсягом апарату, що негативно позначається на результатах культивування. Процес розчинення кисню в культуральній рідині залежить в загальному випадку від різниці концентрацій кисню в газовій і рідкій фазах, площі контакту фаз, а також гідродинамічної обстановки на межі розподілу фаз [5]. Варто зауважити, що основний опір масоперенесення кисню надає рідина, опором масопереносу всередині газової фази, а також опором на межі рідина – клітина, зазвичай, нехтують.

Одним з методів, що забезпечують направлений вплив на оброблювані рідкі середовища в процесах диспергування, розчинення, емульгування, перемішування, каталізу та ін., слід вказати метод дискретно-імпульсного введення енергії [6]. Принцип методу полягає в тому, щоб попередньо стаціонарно введену і довільним чином розподілену в робочому обсязі енергію акумулювати (сконцентрувати) в локальних дискретних точках системи і надалі імпульсно реалізувати для досягнення необхідних

теплофізичних ефектів. Метою застосування методу визнана інтенсифікація тепло-масообмінних і гідродинамічних процесів у технологічних середовищах, а також створення методики їх оптимізації і способів управління ними. Реалізація методу передбачає створення великої кількості рівномірно розподілених в дисперсному середовищі робочих органів або робочих елементів, які трансформують стаціонарну теплову, механічну або інші види енергії в енергетично потужні імпульси, дискретні в часі і в просторі. Супроводжуючі ці явища ударні хвилі, міжфазна турбулентність, кавітація, проникаючі кумулятивні мікроструї, вихори викликають на міжфазних поверхнях нестійкості типу Релея-Тейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до значного збільшення сумарної поверхні контакту фаз і інтенсифікації процесів масо-і теплоперенесення [7]. Метод дискретно-імпульсного введення енергії реалізується в різних апаратах. Найбільш поширеними є імпульсний пульсатор, роторно-дискові і роторно-пульсаційні апарати. Застосування кожного із зазначених типів апаратів, а також конструктивні особливості робочих органів і режими обробки визначаються метою обробки, фізико-хімічними властивостями середовища, енергетичними затратами.

Метод дискретно-імпульсного введення енергії як метод, що інтенсифікує процеси на межі газ – рідина знайшов застосування в біотехнології, в процесі аерації водойм для вирощування риби, активації дріжджів у спиртовому виробництві [8-10].

Мета. Інтенсифікація процесу абсорбції кисню методом дискретно-імпульсного введення енергії в роторно-пульсаційному апараті в ферментаційній установці при аерації культуральних середовищ, а також вплив такої обробки на процес вирощування дріжджів.

Під час роботи досліджувався процес аерації культурального середовища при вирощуванні дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* на розчинах м'яси в установці з дискретно-імпульсним введенням енергії.

Матеріали і методи. Роторно-пульсаційний апарат (РПА) призначений для трансформації введеної методом дискретно-імпульсного введення електричної енергії (ДІВЕ) у фізичний, гідродинамічний, акустичний вплив на культуральне середовище. Апаратурно-технологічну схему дослідно-промислової тепломасообмінної установки представлено на рис. 1.

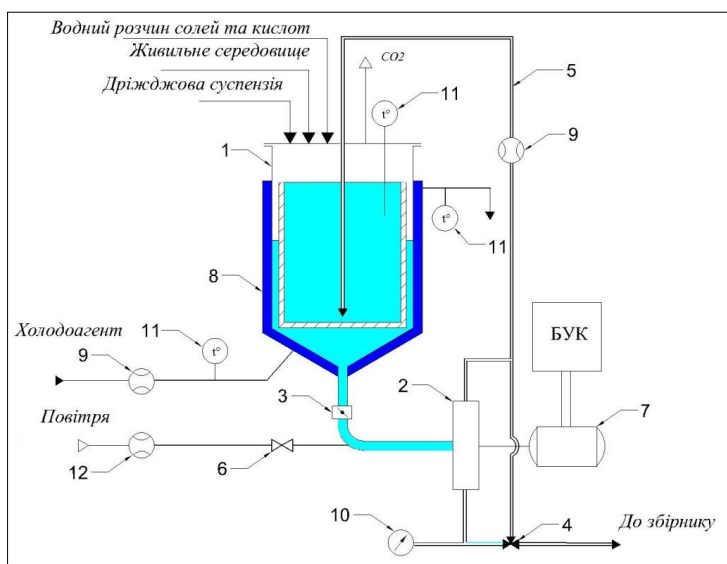


Рис. 1. Апаратурно-технологічна схема дослідно-промислової тепломасообмінної установки:

- 1 – ємність-накопичувач із внутрішнім циліндром; 2 – РПА;
- 3 – заслінка; 4 – триходовий кран;
- 5 – трубопровід рециркуляції;
- 6 – двоходовий кран;
- 7 – електродвигун; 8 – сорочка охолодження; 9 – витратомір рідини; 10 – манометр;
- 11 – термометр; 12 – витратомір повітря; БУК – блок управління і контролю

Апарат в повному зборі включає в себе встановлені на валу диск з лопатками – робоче колесо відцентрового насоса, роторно-пульсаційний вузол, який представляє собою розташовані в корпусі нерухомий статор і два ротори, встановлені на валу двигуна. Статор і ротори виконані у вигляді обичайок з прорізами прямокутної форми. Робочий об'єм РПА – $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Повітря на аерацію через фільтр подається шляхом самовсмоктування. Подача повітря відбувається за рахунок локального розрядження в

напірному трубопроводі. Багаторазовість обробки здійснюється за рахунок рециркуляції культурального середовища по контуру ємність – накопичувач – роторно-пульсаційний апарат – ємність – накопичувач. Міжциліндровий зазор змінювався за рахунок набору роторів.

Блок управління і контролю призначений для управління, контролю і регулювання роботи електрообладнання. Блок складається з магнітного пускача, перетворювача частоти, амперметра, лічильника електроенергії.

Швидкість абсорбції кисню визначали шляхом прирівнювання швидкості розчинення кисню до швидкості споживання його дріжджовими клітинами.

Припускаючи те, що весь кисень, який споживається клітиною, витрачається на процес її поділу, швидкість споживання розраховували, виходячи з величини приросту дріжджової маси. Виконання згаданої умови дозволило за кількістю біомаси дріжджів, що виросла за період культивування, визначити швидкість абсорбції кисню. Методика отримання вихідних даних для визначення швидкості масопереносу була наступна.

В ємність-накопичувач подавали попередньо підготовлене живильне середовище. Освітлення меляси відбувалося кислотно-холодним методом. Отриманий розчин (1:1, вміст сухих речовин – 37%), розведений з артезіанською водою до вмісту сухих речовин, передбаченого програмою експерименту, доводили до температури 30°C.

Вміст сухих речовин визначали за допомогою рефрактометра. Отримане поживне середовище підкислювали ортофосфорною кислотою до рН 5,0. Розчини поживних солей, ростові речовини готували окремо.

Сумішшю розчину меляси і поживних речовин заповнювали ємність-накопичувач. Об'єм рідини визначали за висотою заповнення рівнеміра.

Частотним перетворювачем встановлювалася частота обертів робочого вала. Після включення апарату температуру середовища доводили до 30 °C. Відкривали вентиль подачі повітря. Підготовлені засівні дріжджі розводили водою до концентрації, передбаченої програмою досліджень, а потім подавали в ємність-накопичувач. Через 5 хв після засіву відбирали контрольну пробу культуральної рідини. Проводили визначання біомаси дріжджів, визначання кількості мертвих клітин. Проби відбирали протягом періоду культивування щогодини. Температуру культивування підтримували за рахунок пуску холодної води в сорочку.

Висоту піни визначали візуально через оглядове вікно. При перевищенні критичного рівня в ємність-накопичувач подавали емульсію олеїнової кислоти. Концентроване живильне середовище (1:1), розчини поживних солей і ростових речовин розраховували виходячи з передбачуваної питомої швидкості росту. Подача живильних і ростових речовин здійснювали щопівгодини протягом усього періоду культивування.

Отриману масу дріжджів визначали зважуванням на аналітичних вагах за стандартною методикою.

Визначання кількості мертвих клітин проводили шляхом прямого підрахунку в камері Горяєва.

Основними параметрами, які змінювалися в процесі обробки культуральних середовищ, були частота пульсацій потоку і швидкість зсуву потоку. Перший параметр визначався кількістю пазів в обичайках і характеризував частоту впливу на оброблюване середовище імпульсів тиску, що генеруються при суміщенні пазів статора і ротора. Другий параметр враховував вплив межциліндрового зазору на обробку культурального середовища.

Результати. Вихідна концентрація дріжджових клітин в культуральній рідині об'ємом 30 л становила 20 г/л. Культивували дріжджі протягом 8 годин.

Величину годинного приросту визначали залежно від концентрації дріжджової біомаси при різних режимах обробки. Наведено залежності концентрації дріжджів і

величин погодинного приросту біомаси при обробці методом ДІВЕ з різними швидкостями зсуву потоку (рис. 2-4).

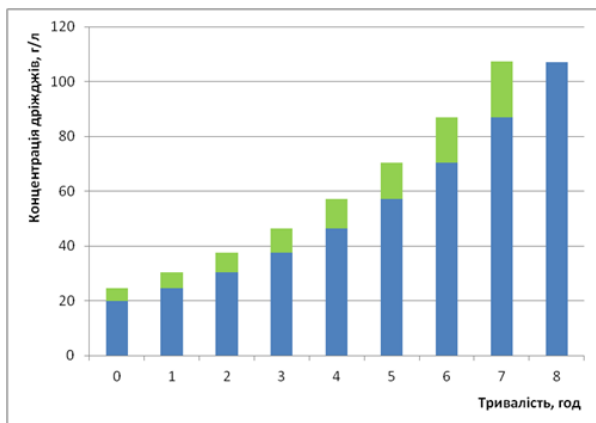


Рис. 2. Залежність концентрації дріжджів у часі за швидкості зсуву потоку $85,46 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ (світлим позначено погодинний приріст)

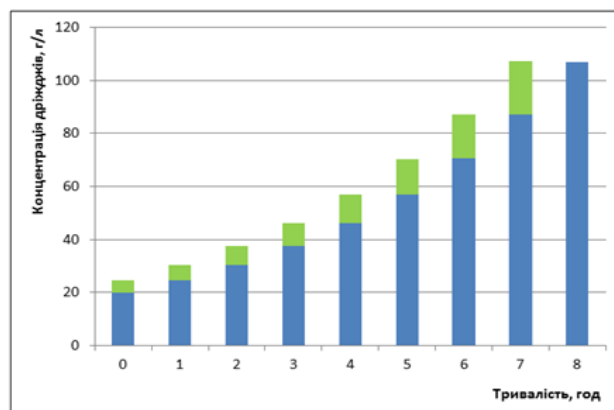


Рис. 3. Залежність концентрації дріжджів у часі за швидкості зсуву потоку $114 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$

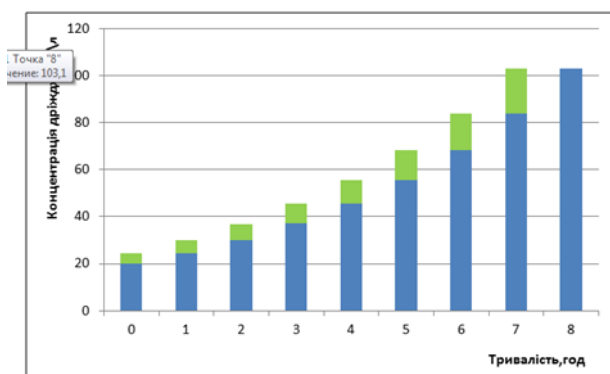


Рис. 4. Залежність концентрації дріжджів в часі при швидкості зсуву потоку $125,3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$

На підставі отриманих даних щодо зростання біомаси за останню годину визначено швидкість абсорбції кисню в культуральному середовищі [11].

Наведено залежність швидкості абсорбції кисню від кутової швидкості ротора за різного вмісту сухих речовин в культуральному середовищі (табл. 1).

Варто зауважити, що зі збільшенням кутової швидкості ротора від 38,2 до 47,75 об/с швидкість абсорбції кисню зростає. Встановлено, що швидкість абсорбції кисню залежить від концентрації вмісту сухих речовин в

середовищі. При зменшенні вмісту сухих речовин від 10 до 5% шляхом обробки з кутовою швидкістю 47,75 об/с, швидкість абсорбції кисню збільшується в 1,9 раза.

При проведенні дослідження зацікавленість представляв вплив на швидкість абсорбції кисню частоти пульсацій потоку при різному вмісті сухих речовин (табл. 2).

Таблиця 1

Залежність швидкості масопереносу від кутової швидкості ротора за різного вмісту сухих речовин

Вміст сухих речовин, %	Кутова швидкість ротора, об/с			
	38,2	43	47,75	52,52
10	3,4	3,8	4,065	3,82
5	4,35	4,7	4,88	4,59
3	6,4	7	7,33	6,9

Таблиця 2

**Залежність швидкості масопереносу від частоти пульсації потоку
за різного вмісту сухих речовин**

Вміст сухих речовин, %	Частота пульсацій потоку, кГц			
	2	2,483	2,865	3,15
10	2,2	3,6	4,065	3,82
5	3,2	4,5	4,88	4,59
3	5	6,8	7,33	6,9

Як свідчать наведені дані, збільшення частоти пульсацій потоку від 2 до 3,85 кГц призводить до зростання швидкості масоперенесення від 5 до 7,3 г/л на годину за вмісту СР 3%, від 3,5 до 4,8 г/л на годину за вмісту СР 5% і від 2 до 4 г/л на годину за вмісту СР 10%. Помітне збільшення частоти пульсації призводить до "жорсткого" режиму обробки, що негативно позначається на динаміці зростання дріжджів.

При визначенні впливу механізмів ДІВЕ на швидкість перенесення маси важливим фактором є зазор між ротором і статором, який враховує вплив такого показника, як швидкість потоку зсуву, який визначається як відношення радіальної швидкості потоку щодо товщини зазору між ротором і статором. Експериментальні дані показують вплив швидкості зсуву потоку на швидкість абсорбції кисню за різного вмісту твердої фази в середовищі (табл. 3).

Таблиця 3

**Залежність швидкості перенесення маси
від швидкості зсуву потоку за різного вмісту сухих речовин**

Вміст сухих речовин, %	Швидкість зсуву потоку, $\cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$			
	57	85,46	114	125,3
10	2,2	3,6	4,065	3,82
5	3,2	4,5	4,88	4,59
3	5	6,8	7,33	6,9

Встановлено, що зі збільшенням швидкості зсуву потоку швидкість абсорбції кисню зростає, проте збільшення значення цієї величини веде до необхідності отримання малих (менше 100 мкм) зазорів, що технічно важко виконати. Оптимальний діапазон значень швидкості зсуву потоку знаходиться в межах $90 - 114 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$.

Високі значення швидкості росту на низькоконцентрованих середовищах вказують на те, що кисень у таких середовищах розчиняється повніше, однак швидке поглинання дріжджовою масою вуглецевмісних поживних речовин змушує подавати свіжу воду у живильне середовище практично безперервно, що створює певні труднощі в підтримці стабільної динаміки зростання, тому початкова концентрація сухих речовин культуральної рідини повинна бути не нижче ніж 10%.

Висновки. Контролюючи процес ДІВЕ і змінюючи конструктивні параметри роторно-пульсаційного апарату, можна впливати на швидкість абсорбції кисню в культуральному середовищі. Це можна пояснити зменшенням середнього діаметра бульбашок повітря в просторі між робочими частинами апарату, що значно збільшує площу контакту фаз.

Збільшення питомої масової витрати до 4,1 г/л·год дозволяє інтенсифікувати процес вирощування дріжджів, а саме, зменшити тривалість процесу від 8 до 12 годин і збільшити кінцеву концентрацію в дріжджах від 2 рази, порівняно зі звичайною технологією.

Збільшення ступеня впливу на культуральне середовище швидкості зсуву потоку вище, ніж $114 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ призводить до зниження виходу готового продукту. Це може бути пов'язано з тим, що інтенсифікація фізичних та гідродинамічних ефектів в апараті призводить до інактивації деяких клітин.

Бібліографія

1. Pepper Ian. L., Gerba C. P. *Environmental Microbiology* (Third edition). Elsevier. Amsterdam. 2015. P. 705.
2. Mounsef J., Salameh D., Louka N., Brandam C, Lteif R. The effect of aeration conditions, characterized by the volumetric mass transfer coefficient K_{La} , on the fermentation kinetics of *Bacillus thuringiensis* kurstaki. *Chemical Engineering Science*. 2015. V. 210. P. 100-106.
3. Xu C., Won Yun J., Influence of aeration on the production and the quality of the exopolysaccharides from *Paecilomyces tenuipes* C240 in a stirred-tank fermenter. *Enzyme and Microbial Technology*. 2004. V. 210. 1. P. 33-39.
4. Druzinec D., Salzig D., Kraume M., Czermak P., Micro-bubble aeration in turbulent stirred bioreactors: Coalescence behavior in Pluronic F68 containing cell culture media, *Chemical Engineering Science*. 2015. V. 126. P. 160-168.
5. Ghasem D. Najafpour. *Biochemical engineering and biotechnology*. Elsevier, Amsterdam. 2007. p. 650.
6. Долинский А. А., Иваницкий И. Г. Тепломассоперенос и гидродинамика в парожидкостных средах. Тепловые основы дискретной входной импульсной энергии. Київ: Наукова думка, 2008. С. 234.
7. Диспергирование гетерогенных систем в роторно-пульсационных аппаратах дисково-цилиндрического типа: дис. канд. техн. наук: 05.14.06. Грабова Татьяна Леонидовна; Ин-т техн. теплофизики НАН Украины. Київ, 2007. 221 с.
8. Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей / под общ. ред. А. А. Долинского; Институт технической теплофизики НАН Украины. К.: Академперіодика, 2015. 464 с.
9. Долинский А. А., Ободович А. Н., Боргаленко Ю. И. Метод ввода дискретной импульсной энергии и его реализация. Харьков: Апостроф. 2012. С. 156.
10. Pauline M. Doran, *Bioprocess Engineering Principles* (Second Edition). Elsevier. 2013. P. 761-852.
11. Bessarab O., Obodovich O., Sydorenko V. Intensification of mass transfer processes in gas-liquid media by discrete-pulse energy input method. *Ukrainian Food Journal*. 2016. Vol. 5. Issue 2. P. 368-375.

References

1. Pepper, Ian. L., Gerba, C. P. (2015). *Environmental Microbiology* (Third edition). Elsevier, Amsterdam, 705.
2. Mounsef, J., Salameh, D., Louka, N., Brandam, C, Lteif, R. (2015). The effect of aeration conditions, characterized by the volumetric mass transfer coefficient K_{La} , on the fermentation kinetics of *Bacillus thuringiensis* kurstaki, *Chemical Engineering Science*, V. 210. 100-106.
3. Xu, C., Won, Yun J. (2004). Influence of aeration on the production and the quality of the exopolysaccharides from *Paecilomyces tenuipes* C240 in a stirred-tank fermenter. *Enzyme and Microbial Technology*. V. 210, 1. 33-39.
4. Druzinec, D., Salzig, D., Kraume, M., Czermak, P. (2015). Micro-bubble aeration in turbulent stirred bioreactors: Coalescence behavior in Pluronic F68 containing cell culture media. *Chemical Engineering Science*. V. 126. 160-168.
5. Ghasem, D. Najafpour. (2007). *Biochemical engineering and biotechnology*. Elsevier, Amsterdam. p. 650.
6. Dolinskiy, A., Ivanitskiy, G. (2008). *Teplomassoperenos i gidrodinamika v parozhidkostnykh sredakh. Teplovye osnovi diskretnoi vkhodnoi impulsnoi energii*. [Heat and mass transfer and hydrodynamics in the vapor-liquid media. Thermal basics of discrete input pulse energy]. Naukova dumka [Scientific thought]. Kyiv. 234 [in russian].
7. Grabova, T. (2007). *Dispergirovanie geterogennikh sistem v rotorno-pulsatsionnykh apparatakh diskovo-tsilindricheskogo tipa: dis. kand. tekhn. nauk* [Dispersion of heterogeneous systems in a rotary-pulsation apparatus of disc-cylindrical type], PhD dissertation (Engineering). Instytut tekhnicheskoi teplofizyky [Institute of engineering thermophysics]. 221. [in russian].
8. Dolinski, A. (2015). Mikro- i nano- urovnevie protsesi v tekhnologiyakh DIVE [Micro and nano leveled processes DPIE technologies]. *Akademperіodika* [Academic periodical]. Kyiv. 422-437 [in russian].
9. Dolinski, A. Obodovich, A., Borhalenko, Yu. (2012). *Metod vvoda diskretnoi impulsnoi energii i yego realizatsiya*. [The method of discrete pulse energy input and its implementation]. Apostrof [Apostrophe]. Kharkiv. 156 [in russian].
10. Pauline, M. Doran. (2013). *Bioprocess Engineering Principles* (Second Edition). Elsevier. 761-852.
11. Bessarab, O., Obodovich, O., Sydorenko, V. (2016). Intensification of mass transfer processes in gas-liquid media by discrete-pulse energy input method. *Ukrainian Food Journal*. Volume 5. Issue 2. 368-375.