

HYDRODYNAMIC STUDY OF A LIQUID JET GROUP IN APPLIANCES WITH CYLINDRICAL DISTRIBUTION DEVICES

V. Bondar, O. Bilyk, N. Ivashchenko

National University of Food Technologies

Keywords:

*Vapor-Liquid Flows,
Cylindrical Jets,
Condensation,
Heat Exchange,
Hydrodynamics,
Heat Exchange Devices*

Article history:

Received 27.03.2023
Received in revised form
07.04.2023
Accepted 17.04.2023

Corresponding author:

O. Bilyk
E-mail:
bilyklenna@gmail.com

ABSTRACT

The analysis of existing studies regarding the process of steam condensation from a vapor-gas mixture on liquid jets allows us to conclude that the vast majority of them are experimental in nature, so the results of these studies can be correctly used only for the appropriate range of parameter changes of the liquid and gaseous phases. Also, the subject of research in them is mainly the hydrodynamic mode of a continuous liquid jet along its entire length.

During theoretical and experimental studies, it was established that the shape of the jets flowing out of the cylindrical holes counter to the oncoming steam current differs from cylindrical shape, depends on the flow parameters, and is characterized by their rotation with intense wave formation on the jet surfaces. The jets are combined with each other with their subsequent disintegration along the current, dispersed and carried away with the steam current. Accordingly, it is incorrect to apply existing methods of heat transfer calculation to the analysis of heat transfer in this type of jets, only on solid jets of liquid, outside the investigated range of parameters. That is, using classical equations is impossible due to the complexity of calculating the cross-sectional area of jet groups flowing through cylindrical holes, and accordingly, the area of the heat exchange surface. Namely, it is impossible to use the traditional concept of the heat transfer coefficient as a parameter. Therefore, most of the existing calculation methods are based on using dimensionless complexes that describe the degree of change in the temperature of the liquid along the length of the jets under the appropriate geometric conditions. That is, without finding the limits of changes in the continuity of liquid jets, determining the limiting hydrodynamic modes using the existing methods of heat exchange calculation is incorrect.

ГІДРОДИНАМІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГРУПИ СТРУМЕНІВ РІДИНИ В АПАРАТАХ ІЗ ЦИЛІНДРИЧНИМИ РОЗПОДІЛЬНИМИ ПРИСТРОЯМИ

В. І. Бондар, О. А. Білик, Н. В. Іващенко

Національний університет харчових технологій

Аналіз існуючих досліджень процесу конденсації пари з парогазової суміші на струменях рідини дає змогу зробити висновок про те, що переважна їх більшість має експериментальний характер, тому результати цих досліджень коректно використовувати тільки для відповідного діапазону змін режимних параметрів рідкої та газоподібної фази. Також переважно предметом дослідження є гідродинамічний режим суцільного по всій його довжині струменю рідини.

Під час проведення теоретичного та експериментального досліджень встановлено, що форма струменів, які витікають із циліндричних отворів протитечією до набігаючого парового потоку, відрізняються від циліндричної, залежить від параметрів течії, характеризуються їх обертанням з інтенсивним хвилюванням на поверхнях струменів. Струмені поєднуються між собою з подальшим їх розпадом вздовж течії, диспергуються та виносяться з паровим потоком. Відповідно, застосування до аналізу теплообміну в струменях цього типу існуючих методик розрахунку теплоперенесення тільки на суцільних струменях рідини, поза межами дослідженого діапазону параметрів є некоректним. Тобто внаслідок складності обчислення площі поперечного перерізу груп струменів, які витікають через циліндричні отвори, а відповідно до цього, і площі поверхні теплообміну, використання класичних рівнянь неможливе, тобто відсутня можливість як параметр використовувати традиційне поняття коефіцієнта тепловіддачі. Через це більшість існуючих методик розрахунків базується на використанні безрозмірних комплексів, які описують ступінь зміни температури рідини вздовж довжини струменів за відповідних геометричних умов. Тобто без знаходження меж зміни суцільності струменів рідини, визначення граничних гідродинамічних режимів використання існуючих методик розрахунку теплообміну некоректне.

Ключові слова: парорідинні потоки, циліндричні струмені, конденсація, теплообмін, гідродинаміка, теплообмінні апарати.

Постановка проблеми. Якщо розглядати тепломасообмінні апарати змішування, які використовуються в харчовій промисловості, з точки зору руху потоків теплоносіїв, то одним з найбільш важливих питань є визначення граничних параметрів течій, які визначають початок руйнування суцільної структури струменя, тобто початок його диспергування (Harvie, & Fletcher, 2021).

Гідродинамічний режим роботи теплообмінних апаратів впливає на стабільність його роботи, а також обумовлює умови перенесення теплової енергії та маси (Sokolenko, Shevchenko, Vasylykivskyi, Boiko, & Shevchenko, 2019). Але на сьогодні немає рекомендацій щодо розрахунку гідродинамічних режимів апаратів з циліндричними розподільчими пристроями, а саме для групи циліндричних вільностікаючих струменів рідини, і, відповідно, їх конструктивних розрахунків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В харчовій промисловості набули широкого застосування тепломасообмінні апарати з безпосереднім контактом фаз. Ці апарати використовуються для регенерації теплової енергії, нагрівання води в

контактних водопідігрівачах, під час очищення газів від шкідливих механічних домішок тощо (Achintya Mukhopadhyay, & Swarnendu Sen, 2019). Теплообмінні апарати з безпосереднім контактом фаз порівняно з рекуперативними теплообмінниками мають вищий коефіцієнт енергетичної ефективності, конструктивно не складні, мають меншу металоємність, а також можуть бути виготовлені з неметалевих матеріалів. Це дає змогу створити нові високоефективні тепломасообмінні установки більшої потужності, при цьому зменшити забруднення навколишнього середовища (Harvie, & Fletcher, 2001).

Але на сьогодні широке застосування такого типу обладнання з безпосереднім контактом фаз у харчовій промисловості стримується рядом причин:

- теплотехнологічні показники апаратів не відповідають вимогам, яке ставить сучасне виробництво з високою ефективністю та інтенсифікацією технологічного процесу;

- використання комп'ютерно-інтегрованих технологій для комплексної автоматизації хіміко-технологічних процесів вимагає створення високотехнологічного обладнання з широким діапазоном регулювання їх параметрів без погіршення експлуатаційних характеристик, але, на жаль, існуюче теплообмінне обладнання не в змозі це забезпечити (Bondar, 2013).

Аналіз конструкцій теплообмінних апаратів з безпосереднім контактом фаз (Василенко, Колядюк та ін., 2008), а саме розподільчих пристроїв для надходження рідкого теплоносія в паровий простір апаратів за протитечійного та перехресного току, дає змогу зробити висновок, що однією з найперспективніших для харчової ділками пристроями циліндричного типу.

Створення пароконтактних тепломасообмінних апаратів запропонованого типу і розроблення обладнання різної теплової потужності потребує науково обґрунтованих методик їх теплових, гідравлічних і конструктивних розрахунків (Бондар, 2013). А це все можливе тільки за умови комплексного науково достовірного дослідження та подальшого аналізу результатів.

Мета статті: провести комплексне дослідження гідравлічних характеристик під час конденсації пари з парогазової суміші на поверхні груп циліндричних струменів нестисливої рідини різних геометричних параметрів при змінних витратних характеристиках пароструминних потоків відповідно до умов роботи апаратів харчових виробництв; дослідити гідродинамічні режими струменів під час вільного витікання рідини через циліндричні отвори різних геометричних параметрів; розробити безрозмірний комплекс для розрахунку початку руйнування груп струменів.

Матеріали і методи. Об'єкт дослідження — двофазні парорідинні течії. Предмет дослідження — струменеві течії краплинної рідини з конденсацією пари на їх поверхні. Методи дослідження — експериментальні та математичне моделювання. Дослідна установка, наведена на рис. 1, була виготовлена в Інституті вугільних технологій НАН та змонтована на кафедрі теплоенергетики Національного університету харчових технологій, дає змогу досліджувати процеси теплообміну та гідродинамічні характеристики під час конденсації пари на циліндричних вільностікаючих струменях нестисливої рідини за протитечійного потоку парив широкому діапазоні зміни витратних і режимних параметрів двофазних потоків, характерних для харчової промисловості.

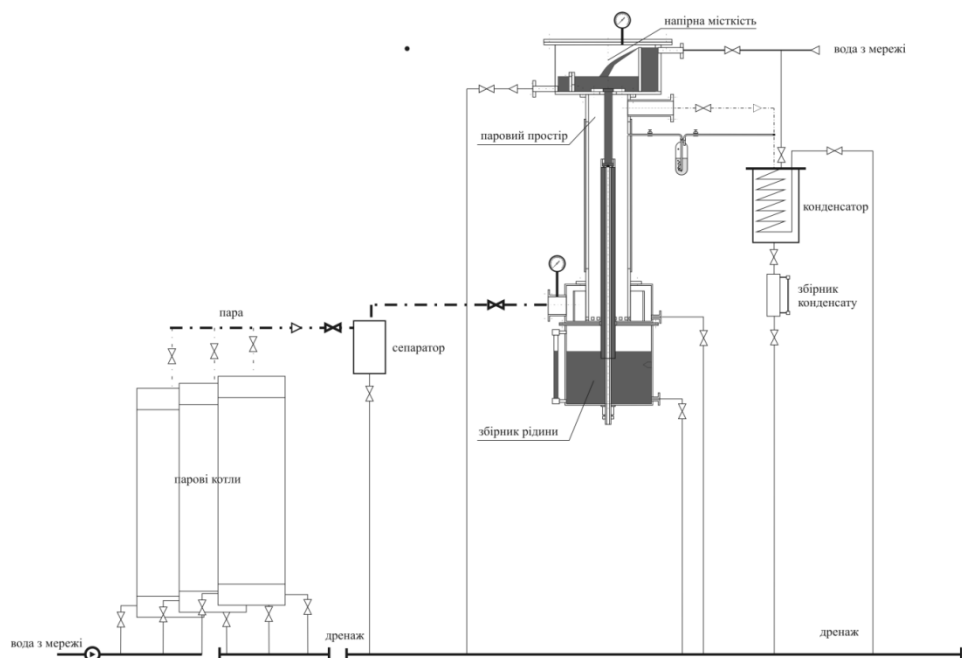


Рис. 1. Установка для дослідження гідродинамічних режимів руху рідини

Рідина витікала в паровий простір через шайбу, в якій зроблені отвори діаметрами в межах 4...10 мм з різною відстанню між отворами. Кількість отворів та крок між ними залежав від діаметра струменів та розміру парового простору, розташування отворів шахове. Під час дослідження гідродинамічних режимів витікання груп циліндричних вільностікаючих струменів рідини використовувався візуальний метод дослідження, як найбільш достовірний.

Викладення основних результатів дослідження. На основі візуального дослідження струменевої течії під час проведення експерименту й аналізу отриманих результатів пропонується така класифікація гідродинамічних режимів руху групи циліндричних вільностікаючих струменів рідини (рис. 2).

1. *Режим стійкої течії.* Струмені під час усього процесу витікання не змінюють своєї форми. Траєкторія руху струменів вертикальна. Форма струменя в перерізі повністю повторює форму отвору, з якого витікає. Пара обтікає групу струменів, практично не змінюючи їхні форми й траєкторії руху (рис. 2, а).

2. *Хвильовий режим.* Перехід між режимом стійкої течії та хвильовим режимом відбувається поступово внаслідок збільшення витрати води та швидкості набігаючого потоку пари. Струмені дестабілізуються. Режим характеризується утворенням хвиль на поверхнях струменів, відхиленням струменя від вертикальної траєкторії витікання та періодичною зміною його форми внаслідок появи на поверхні струменя хвиль (рис. 2, б).

3. *Режим злипання струменів.* Із збільшенням швидкості набігаючого парового потоку зростає амплітуда коливання струменів і, залежно від відстані, між

струменями починається процес зливання струменів, початок диспергування струменів (рис. 2, в).

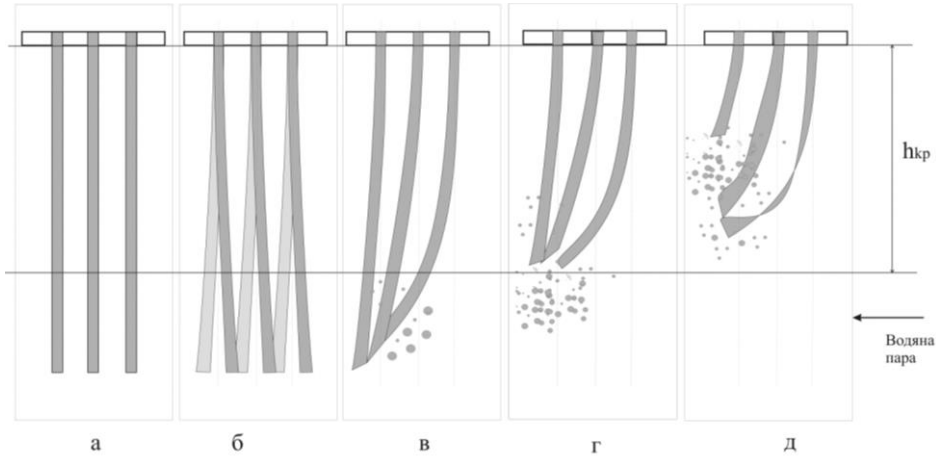


Рис. 2. Режими руху рідини

4. *Диспергований гідродинамічний режим* настає під час подальшого зростання витрати рідини та збільшення швидкості набігаючого парового потоку. Траєкторія витікання рідини з отвору значно відрізняється від вертикального. Струмені рідини відхиляються вбік, різко зростає амплітуда коливань, вони зливаються, порушується суцільність, немає чіткої межі між поодинокими струменями. Утворюються маленькі краплі рідини, які виносяться потоком пари (рис. 2, г).

5. *Граничний гідродинамічний режим*. Пара підхоплює струмені рідини, рідина рухається пеленою, частина рідини виноситься потоком пари з парового простору, частина пари барботує через товщу рідини. Цей режим періодично змінюється на диспергований гідродинамічний (рис. 2, д).

Унаслідок коливальних процесів встановити чіткі межі між наведеними гідродинамічними режимами руху струменів рідини досить складно.

Класифікацію струменевих течій проводили і раніше (Василенко, 2003; Рогоза, 2000; Василенко, Шутюк, & Бондар, 2015; Василенко, Форсюк, & Бондар, 2003), але для вільних струменів, які витікають через щілинні розподільчі пристрої або поодинокі циліндричні.

Стабільність роботи тепломасообмінних апаратів обумовлена початком диспергованого гідродинамічного режиму (Дементьева, 1971; Василенко, Форсюк, Майстренко, & Бондарь, 2008; Sokolenko та ін., 2018), тому надзвичайно важливо визначити умови, за яких починається диспергований гідродинамічний режим, тобто початок втрати струменями своєї суцільності.

Попередній аналіз літературних джерел і гідродинамічного дослідження групи струменів рідини за протитечіного парового потоку дав змогу зробити висновок, що перехід між гідродинамічними режимами залежить від діаметрів отвору, кроку між ними, швидкості рідини, динамічного напору парового потоку, теплофізичних властивостей рідини та пари. Тобто межа існування суцільних струменів і

початок диспергування залежить від таких величин: діаметра струменя рідини, відстані між ними, кінетичної енергії парового потоку, швидкості виходу рідини з отвору, в'язкості, поверхневого натягу, прискорення вільного падіння:

$$h_{xp} = f\left(\left(\rho_n v_n^2\right); v_p; d_0; s; v_p; \sigma_p; \rho_p; g\right). \quad (1)$$

Особливо впливає на початок переходу між *хвилювим режимом і режимом злипання струменів* відстань між сусідніми отворами, що впливає тільки на перехід між двома граничними режимами, тому в описі загальної картини зміни режимів руху рідини її можна не використовувати.

З огляду на вищенаведене можна сказати, що початок диспергування струменів рідини описується такою функціональною залежністю:

$$h_{xp} = f\left(\left(\rho_n v_n^2\right); v_p; d_0; v_p; \sigma_p; \rho_p; g; k\right), \quad (2)$$

в якій k — це коефіцієнт, який враховує відношення кроку між струменями до його отвору.

Якщо використовувати теорію подібності, то відповідно до теореми Букінгема, цю функціональну залежність можна виразити співвідношенням без розмірних величин (Sedov, 1993). Використаємо аналіз розмірностей і метод Релея (Chemloul, 2020) для аналізу розмірних систем. Знайдемо відношення розмірностей змінних, які описують систему витікання струменю, до трьох основних одиниць: маси, довжини, часу; їх розмірності відповідно позначаються $[M]$, $[L]$, $[T]$. Розглядається сім фізичних величин, та вибрані три основні одиниці. Відповідно до π -теореми, число безрозмірних комбінацій повинно дорівнювати $(7-3)=4$. Одне з них визначається, три інші — визначальні. Отже, зміна структури струменя може бути описана за допомогою критеріальної залежності, яка містить в собі три визначальних числа подібності. Визначимо ці числа подібності та функціональну залежність між ними.

Введемо припущення, що між цими величинами існує співвідношення у вигляді:

$$f\left(\left(\rho_n v_n^2\right)^a; \left(v_p\right)^b; \left(d_0\right)^c; \left(v_p\right)^d; \left(\sigma_p\right)^g; \left(g\right)^e; \left(k\right)^i\right) = h_{xp}. \quad (3)$$

Розпишемо цей вираз через розмірності:

$$f\left(\left(M L^{-1} T^{-2}\right)^a; \left(L T^{-1}\right)^b; \left(L\right)^c; \left(L^2 T^{-1}\right)^d; \left(M T^{-2}\right)^g; \left(L T^{-2}\right)^e; \left(L L^{-1}\right)^i\right) = L. \quad (4)$$

Спростимо цей вираз, оскільки $(LL^{-1})^i = 1$, і, як попередньо зазначалося, цей параметр впливає тільки на перехід між двома сусідніми режимами та не впливає на початок граничного гідродинамічного режиму.

Щоб рівняння було однорідним відносно розмірностей, повинні виконуватися такі співвідношення між показниками степеню:

$$\text{для } M: \quad a+g=0;$$

$$\text{для } L: \quad -a+b+c+2d+e=1;$$

$$\text{для } T: \quad -2a-b-d-2g-2e=0.$$

Є три рівняння з п'ятьма невідомими. Спростимо їх, виключивши e , g . Зробивши перетворення, отримаємо:

$$a=-g;$$

$$c=(1+a+b);$$

$$b=(-d).$$

Врахувавши все вищенаведене та підставляючи ці співвідношення для показників степеня у формулу (4), отримаємо:

$$f\left(\left(\rho_n v_n^2\right)^a; \left(v_p\right)^b; \left(d_0\right)^{1+a+b}; \left(v_p\right)^{-b}; \left(\sigma_p\right)^{-a}\right)=h_{kp} . \quad (5)$$

Об'єднуючи члени з однаковими показниками степеня, складаємо безрозмірні комбінації:

$$\frac{h_{kp}}{d_0}=f\left[\left(\frac{\rho_n v_n^2 d_0}{\sigma_p}\right)^a; \left(\frac{v_p d_0}{v_p}\right)^b\right] . \quad (6)$$

Або

$$\frac{h_{kp}}{d_0}=f\left(We^a; Re^b\right), \quad (7)$$

де $We=\frac{\rho_n v_n^2 d_0}{\sigma_p}$ — число Вебера; $Re=\frac{v_p d_0}{v_p}$ — число Рейнольдса.

Далі, перейшовши до безрозмірних координат, отримаємо:

$$h_{kp}^*=f\left(We_{kan}^a; Re^b\right), \quad (8)$$

де $h_{kp}^*=\frac{h_{kp}}{\sqrt{\sigma_p/\rho_p g}}$ — безрозмірна висота початку диспергування струменя;

h_{kp} — висота початку диспергування струменя; $We_{kan}=\frac{\rho_n v_n^2}{\sqrt{\sigma_p \rho_p g}}$ — капілярне

число Вебера; d_0 — діаметр отвору розподільчого пристрою.

Як визначальний розмір струменя доцільно було прийняти діаметр струменя для суцільної ділянки, але, внаслідок складності вимірювання цієї величини, характерним розміром вибрано діаметр отвору розподільчого пристрою. По-перше, цей розмір легко контролюється, ним легко оперувати в розрахунках та експериментах; по-друге, він спільно з іншими введеними в безрозмірне рівняння (5) величинами опосередковано характеризує розпад струменя.

Також бажано враховувати змінність фізичних параметрів рідини та пари. Однак аналіз дослідних даних вказує на незначну межу змін фізичних параметрів потоків. Для отримання кількісних співвідношень будуть проведені відповідні дослідження.

Висновки

1. Через відсутність методики розрахунків дослідження теплообміну та гідродинамічних характеристик для груп вільностікаючих струменів рідини, що витікають через циліндричні розподільчі пристрої, в діапазоні змін параметрів, характерних для теплообмінних апаратів харчової промисловості, було проведено комплексне дослідження гідравлічних характеристик під час конденсації пари з парогазової суміші на поверхні груп циліндричних струменів нестисливої рідини.

2. Аналіз гідродинаміки групи циліндричних струменів рідини дав змогу розробити фізично обґрунтовану класифікацію режимів його течії: режим стійкої течії, хвильовий режим, режим злипання струменів, диспергований гідродинамічний режим і граничний гідродинамічний режим.

3. Аналіз результатів дослідження дав змогу розробити безрозмірнісний комплекс для розрахунку початку руйнування груп струменів, що витікають з циліндричних розподільчих пристроїв за протитечійного та перехресного парового потоку.

Література

Бондар, В. І. (2013). *Теплообмін під час конденсації пари на поверхні циліндричного струменя рідини*. Київ, Національний університет харчових технологій.

Бондар, В. І., Василенко, С. М. (2013). *Гідродинаміка поодинокого струменя рідини за протитечійного потоку пари*. Проблеми промислової теплотехники: VIII Міжнарод. конф. Київ: НУПТ.

Василенко, С. М. (2003). *Теплообмін в парорідинних течіях теплообмінних апаратів харчових виробництв*. Київ, Нац. ун-т харч. технологій.

Василенко, С. М., Колядюк, Н. О., Бойко, В. О., Бондар, В. І. (2008). *Оптимізація тепломасообмінних апаратів з безпосереднім контактом фаз в структурі теплотехнічного комплексу цукрового заводу*. Матеріали доповідей 74-ї наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. К.: НУХТ.

Василенко, С. М., Форсюк, А. В., Бондар, В. І. (2003). Гідродинаміка парорідинних течій у плівкових випарних апаратах. *Харчова промисловість*, 2, 37—45.

Василенко, С. М., Форсюк, А. В., Майстренко, І. А., Бондарь, В. І. (2008). Моделирование гидравлических режимов кольцевых парожидкостных течений. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*, 6, 101—111.

Василенко, С. М., Шутюк, В. В., Бондар, В. І. (2015). Гідродинаміка окремих струменів рідини в апаратах з циліндричними розподільчими пристроями. *Цукор України*, 11(119), 86—97.

Дементьева, К. В. (1971). *Исследование контактного теплообмена в процессе конденсации пара на струях переохлажденной жидкости*. Киев.

Рогоза, О. Б. (2000). *Теплообмін при конденсації водяної пари на поверхні вільного струменя рідини*. Київ, Укр. держ. ун-т харч. технологій.

Achintya Mukhopadhyay, Swarnendu Sen (2019). Fundamentals of Combustion Engineering. <https://doi.org/10.1201/9780429158216>.

Bondar, V., Vasylenko, S., Klymova, O. (2013). *Study of heat exchange in the enthalpy exchanger with direct contact of phases*. The Second North and East European Congress on Food NEEFood—2013. K.: NUFT.

Chemloul, N.-E. S. (2020). Dimensional Analysis: Rayleigh Method and Vaschy-Buckingham Method. In: Dimensional Analysis and Similarity in Fluid Mechanics. <https://doi.org/10.1002/9781119788041.ch2>.

Harvie, D. J. E., Fletcher, D. F. (2010). A simple kinetic theory treatment of volatile liquid-gas interfaces. *Transactions of ASME. Journal of Heat Transfer*, 123, 486—491.

Sedov, L. I. (1993). Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. <https://doi.org/10.1201/9780203739730>.

Sokolenko, A., Shevchenko, O., Vasylykivskyi, K., Boiko, O., Shevchenko, A. (2019). Modeling and synthesis of systems of intensive mass exchange. *Ukrainian Food Journal*, 8(4), 861—872. DOI: 10.24263/2304-974X-2019-8-4-16.

Sokolenko, A., Shevchenko, O., Vasylykivskyi, K., Stepanets, O., Maksymenko, I., Shevchenko, A. (2018). Intensification of energy and mass exchange processes in fermentation technologies: monograph, MEDIATEN, Pleven.