

**В.М. Марчевський, к.т.н., проф.  
Я.В. Гробовенко, асист.**

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

## **Аеродинаміка вихрових потоків сушильного агента в сушильній камері**

*Досліджено гідравлічні особливості вихрових потоків у сушильній камері оригінальної конструкції, що використовується для отримання тонкодисперсних матеріалів із паст.*

*Для побудови 3-х вимірних рисунків з рухомими елементами та розрахунків параметрів вихрових потоків сушильного агента застосовувалась автоматизована система проектування та розрахунків SolidWorks Simulation. Проведено аналіз руху вихрових потоків, полів швидкостей та перепаду тиску сушильного агента.*

*В результаті проведеної роботи отримано аеродинамічні показники вихрових потоків сушильного агента, при аналізі яких можна вдосконалити процес сушіння пастоподібних матеріалів та розробити найбільш ефективну конструкцію сушильних апаратів вихрового типу. Проаналізовано напрями вихрових потоків сушильного агента при різних початкових витратах ( $0,033 \text{ м}^3/\text{с}$  та  $0,028 \text{ м}^3/\text{с}$ ) та отримано дві складові швидкостей: осьову і тангенціальну. Осьова швидкість зосереджена по центру сушильної камери, вона транспортує тонкодисперсні частинки матеріалу із зони розмелювання в зону досушування та виносить із камери. Тангенціальна швидкість газової фази зосереджена по периферії сушильної камери, яка сепарує частинки матеріалу і збільшує ефективність теплообміну між частинками і теплоносієм за рахунок турбулізації загального двохфазного потоку і збільшення числа  $Re$ . Тангенціальна швидкість вихрового потоку зменшується внаслідок зменшення радіусу сушильної камери. Визначено коефіцієнт закручування вихрових потоків, що складає  $5,5 \dots 7,0$ .*

*Проаналізовано поля розподілу тисків по об'єму оригінальної сушильної камери та визначено загальний перепад тиску. Завдяки заданій формі камери та закручених вихрових потоків сушильного агента тиск зменшується від максимального значення у верхній частині камери до мінімального у нижній частині, за рахунок чого вологі агломерати по конусоподібних стінках повертаються в зону диспергування.*

**Ключові слова:** сушильна камера; аеродинаміка; моделювання; вихрові потоки; сушильний агент; перепад тиску; поля швидкостей потоку.

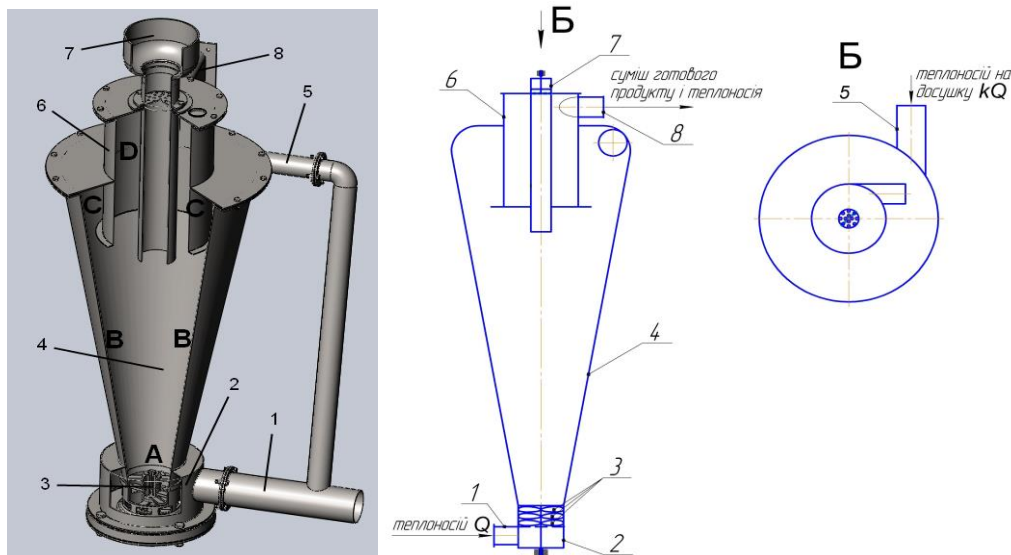
**Постановка проблеми.** Для розробки методів розрахунку процесів тепло- і масообміну та створення відповідного устаткування із двохфазними середовищами, перш за все, необхідно знати розподіл потоку газу між безперервною газовою і дискретною фазами шару. Ці завдання становлять основу в описі поведінки двохфазних середовищ, а саме вихрових потоків, і тому викликають великий інтерес до цих проблем. Однак задовільні кількісні закономірності, які адекватно відображають аеродинамічні та гідродинамічні характеристики вихрових потоків, і сьогодні в літературі зустрічаються рідко.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичним моделюванням гідродинаміки вихрових потоків у тепломасообмінних апаратах з киплячим шаром займався А.Є. Артюхов [1]. Вплив гідродинаміки вихрових потоків у двохфазних системах на геометрію тепломасообмінного обладнання розглядався в роботах [2, 3, 4, 5]. Аналіз фізичної моделі та рішень математичного опису процесу сушіння тонкодисперсних паст, виконаний нами в роботі [6], М.М. Малаховим в роботі [7] та І.Ю. Алексаняном в роботі [9], показав, що на процес сушіння пасту має істотний вплив швидкісний режим вихрових потоків сушильного агента. Вплив закручених потоків сушильного агента та аналіз полів швидкостей і перепад тиску на ефективність висушування вологих тонкодисперсних матеріалів відображено в роботах [8, 10].

Однак у перелічених роботах аеродинаміка вихрових потоків, визначення ступеня закручення вихрових потоків та полів швидкостей і тисків сушильного агента не розглядалося, тому звідси і визначається мета даної роботи.

**Мета дослідження.** Встановлення аеродинамічних характеристик в оригінальній вихровій камері за допомогою можливостей автоматизованої системи проектування та моделювання *SolidWorks Simulation 2017*.

**Викладення основного матеріалу.** Розроблено оригінальну конструкцію сушильної камери, в якій сушильний агент рухається у вигляді вихрових потоків внаслідок тангенціального введення та закручення потоку ножами диспергатора. Ці потоки на кожній стадії відіграють важливу роль, крім тепломасообмінних процесів, ще й у переміщенні твердої дисперсії по відповідних зонах сушильної камери А, В, С, D (рис. 1).



1 – основний патрубок подачі сушильного агента; 2 – дифузор;

3 – диспергатор; 4 – конусоподібна сушильна камера; 5 – патрубок подачі сушильного агента для досушування; 6 – циліндр сепарації; 7 – система подачі вологих дисперсій; 8 – вихідний патрубок;

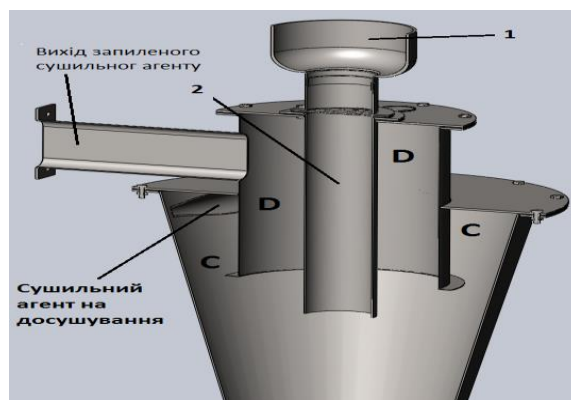
A – зона диспергування; B – зона розділення фракцій; C – зона інтенсивного досушування; D – зона сепарування  
Рис. 1. Схема оригінального сушильного апарату для отримання тонких дисперсій

Сушильний агент, у кількості  $Q$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$ , подається через патрубок 1 у дифузор 2, який розподіляє потоки теплоносія і спрямовує їх у диспергатор 3, де потоки закручуються у вихровий потік за напрямком обертання ножів. Одночасно у верхню частину сушильної камери (рис. 2) тангенційно вводиться, через патрубок 8, сушильний агент кількістю  $kQ$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$ , на досушування тонкодисперсних частинок матеріалу. Вологий матеріал подається в середину сушильної камери 4 за допомогою системи подачі 7. У результаті два потоки зустрічаються в сушильній камері та утворюється загальний закручений вихровий потік сушильного агента і частинок вологого матеріалу. Вихровий потік теплоносія має важливу роль у проведенні тепломасообмінних процесів між двома фазами системи; винесенні із зони диспергування кондиційного матеріалу і спрямування його в зону досушування; опудренні поверхні агломератів вологого матеріалу вже висушеним порошком; транспортуванні тонких дисперсій між зонами A і B сушильного апарату.

У першій зоні A відбувається диспергування тонкодисперсного матеріалу із додаванням підсушеного порошку і висушування поверхневої вологи. У другій пристінній зоні B відбувається розділення твердої фракції за рахунок відцентрової сили, що відкидає важкі частинки на конусоподібну поверхню сушильної камери, які переміщуються знову в зону диспергування A. Далі вже підсушений тонкодисперсний матеріал переміщається в зону досушування C, після чого потрапляє в зону сепарації D. Загальні витрати сушильного агента можна записати, із урахуванням розмірності  $\text{m}^3/\text{c}$ , у вигляді:

$$Q_{\text{заг}} = Q \cdot (1 + k); \quad (1)$$

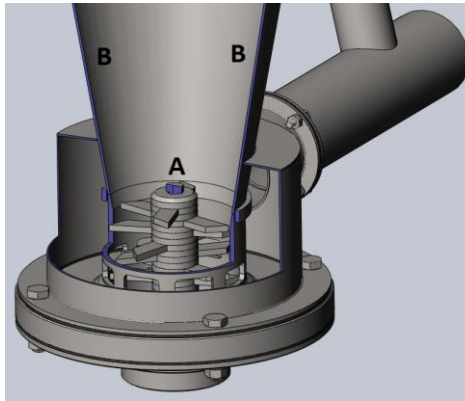
де  $Q$  – витрати сушильного агента, що подаються в нижню частину сушильної камери (рис. 3),  $\text{m}^3/\text{c}$ ;  $k$  – коефіцієнт подачі сушильного агента на досушування тонкодисперсних частинок матеріалу. Коефіцієнт  $k$  для визначення необхідної кількості сушильного агента на досушування визначають із матеріального та теплового балансу.



1 – завантажувальний бункер; 2 – направляюча труба для подачі вологого матеріалу;

C – зона інтенсивного досушування; D – зона сепарування

Рис. 2. Верхня частина сушильного апарату



*A – зона диспергування; B – зона розділення фракцій*  
Рис. 3. Нижня частина сушильного апарату

За допомогою програми автоматизованого проектування і моделювання SolidWorks Simulation 2017 було змодельовано вихровий потік сушильного агента в оригінальній сушильній камері при таких початкових параметрах:

1. основний потік сушильного агента –  $0,033 \text{ м}^3/\text{с}$ , потік сушильного агента на досушування матеріалу –  $0,0066 \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 4 і 5);
2. основний потік сушильного агента –  $0,028 \text{ м}^3/\text{с}$ , потік сушильного агента на досушування матеріалу –  $0,0056 \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 6 і 7).

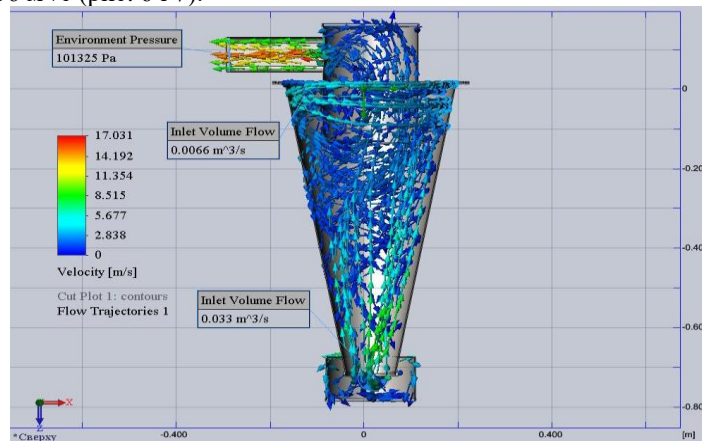
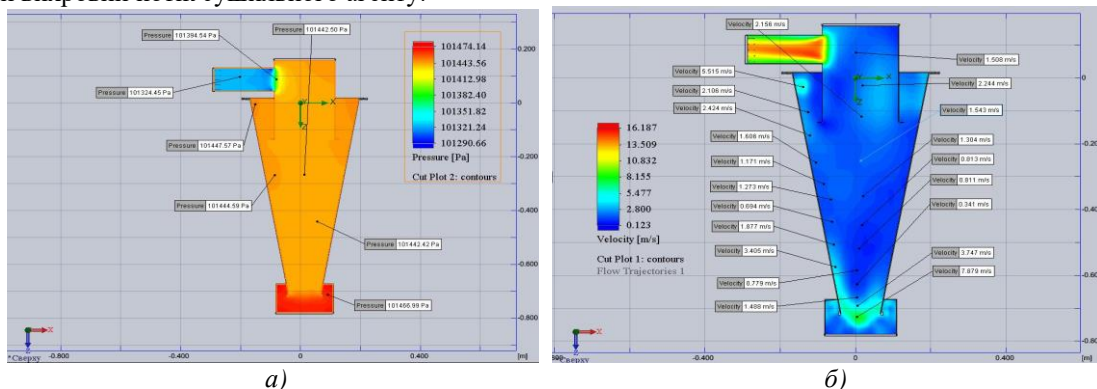


Рис. 4. Вихрові потоки сушильного агента в сушильній камері при основній витраті сушильного агента  $0,033 \text{ м}^3/\text{с}$

Результати моделювання (рис. 4) показують, що у верхній частині сушильної камери створюється стійкий вихровий потік сушильного агента.



*a) – поля розподілу тиску сушильного агента; б) – поля розподілу швидкостей сушильного агента*  
Рис. 5. Розподіл полів тиску і швидкостей вихрових потоків сушильного агента

Як видно із епюри розподілу швидкості сушильного агента (рис. 5 б), розділяються дві складові швидкості: осьова і тангенціальна. Осьова швидкість зосереджена по центру сушильної камери, транспортує тонкодисперсні частинки матеріалу із зони розмелювання в зону досушування та виносить із камери. Тангенціальна швидкість газової фази зосереджена по периферії сушильної камери, сепарує частинки матеріалу

і збільшує ефективність теплообміну між частинками і теплоносієм за рахунок турбулізації загального двохфазного потоку і збільшення числа Re. Тангенціальна швидкість вихрового потоку зменшується внаслідок зменшення радіусу сушильної камери. Коефіцієнт закручування вихрових потоків є відношення тангенційної швидкості до осової та складає 5,5...7,0 для даної конфігурації сушильної камери.

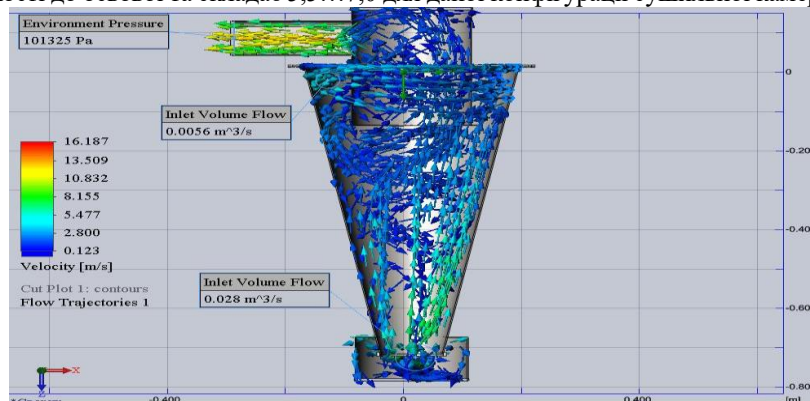
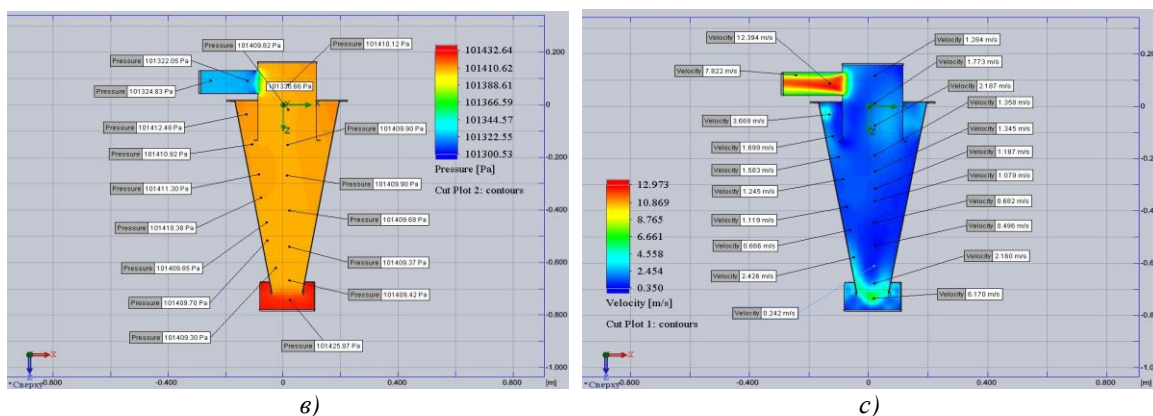


Рис. 6. Вихрові потоки сушильного агента в сушильній камері при основній витраті сушильного агента  $0,028 \text{ м}^3/\text{с}$



в) – поля розподілу тиску сушильного агента; с) – поля розподілу швидкостей сушильного агента  
Рис. 7. Розподіл полів тиску і швидкостей вихрових потоків сушильного агента

Як видно із епюри розподілу тиску сушильного агента (рис. 7 в), завдяки заданій формі камери та закручених вихрових потоків сушильного агента тиск зменшується від максимального значення у верхній частині камери до мінімального у нижній частині, за рахунок чого вологі агломерати по конусоподібних стінках повертаються в зону диспергування.

**Висновок.** Встановлено аеродинамічні характеристики оригінальної сушильної камери, а саме: тиск та швидкість вихрових потоків сушильного агента за допомогою автоматизованої системи проектування та моделювання *SolidWorks Simulation 2017*. Результати дослідження аеродинаміки засвідчують, що:

- внаслідок тангенційного введення сушильного агента на досушування у верхній частині сушильної камери утворюється стійкий вихровий шар;
- тиск сушильного агента в центрі сушильної камери менший, ніж на периферії, значення та перепад якого можна визначити із епор (рис. 5 та 7);
- в оригінальній сушильній камері розділяються дві складові швидкості потоків сушильного агента: осова і тангенційна, поля яких можна визначити із епор (рис. 4–7);
- швидкість сушильного агента в зонах С і D менша, ніж у зонах А і В, що уможливило здійснення сепарування тонкодисперсних підсушених частинок матеріалу від вологих агломератів;
- коефіцієнт закручування потоків складає 5,5...7,0 для даної конфігурації сушильної камери.

#### Список використаної літератури:

1. Артюхов А.Е. Высокоэффективные вихровые аппараты в малотоннажных производствах гранулированных продуктов / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии : тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции «Реактив-2007». – Минск, 2007. – С. 91.
2. Пат. 90798 Україна, МПК В01J2/16, В01J8/08, В01J8/18. Спосіб отримання гранул пористої структури та пристрій для його здійснення / А.Є. Артюхов, В.І. Склабинський, К.В. Жеба // № а200812720 ; заявл. 30.10.2008 ; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.

3. *Склябінський В.І.* Вплив гідродинамічного режиму обробки на міцність гранул пористої аміачної селітри (ПАС) / *В.І. Склябінський, А.Є. Артюхов, В.М. Маренок* // Збірник наукових праць. – Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2007. – С. 83–85.
4. *Марчевський В.М.* Процес сушіння наповнювача паперового полотна / *В.М. Марчевський, Я.В. Гробовенко* // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія : Хімічна інженерія екологія та ресурсозбереження. – 2013. – № 1.
5. *Марчевський В.М.* Процес сушіння діоксиду титану / *В.М. Марчевський, Я.В. Гробовенко* // Міжнародний науковий журнал. – 2016. – № 5. – С. 22–25.
6. *Марчевський В.М.* Процес сушіння діоксиду титану / *В.М. Марчевський, Я.В. Гробовенко* // Міжнародний науковий журнал. – 2016. – № 5 (2). – С. 22–24.
7. Математична модель сушіння дисперсних продуктів в активному гідродинамічному шарі / *М.М. Малахов, С.В. Дяченко, Е.Г. Папуш, О.А. Клименчук* // Вісті вищих навчальних закладів. Серія : Харчова технологія. – 2005. – № 2–3. – С. 97–102.
8. *Іванов І.Г.* Сушка мелкодисперсных материалов в кипящем слое / *И.Г. Иванов.* – М. : Энергия, 2012. – 126 с.
9. *Александрян И.Ю.* Моделирование процесса сушки дисперсного материала в кипящем слое / *И.Ю. Александрян, Л.М. Титова, А.Х. Нугманов* // Техника и технология пищевых производств. – 2014. – № 3 (34). – С. 96–100.
10. *Дмитриев В.М.* Конвективная сушка полидисперсных материалов в аппаратах закрученного взвешенного слоя / *В.М. Дмитриев, Е.А. Сергеева* // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – № 3. – С. 602–606.

#### References:

1. Artjuhov, A.E. and Sklabinskij, V.I. (2007), «Vysokoeffektivnye vihrevye apparaty v malotonnazhnyh proizvodstvah granulirovannyh produktov», *Himicheskie reaktivy, reagenty i processy malotonnazhnoj himii, tezisy dokladov XX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Reaktiv-2007»*, Minsk, p. 91.
2. Artjuhov, A.Je., Sklabins'kyj, V.I. and Zheba, K.V. (2010), *Sposib otrymannja granul porystoi' struktury ta prystrij dlja jogo zdjysnennja* [A method of obtaining granules of a porous structure and a device for its implementation] MPK V01J2/16, V01J8/08, V01J8/18, zajavl. vid 30 zhovtnja, opubl. vid 25 travnja, No. a200812720, Bjul. № 10, Ukraïna, State Register of Patents of Ukraine, Pat. 90798.
3. Sklabins'kyj, V.I., Artjuhov, A.Je. and Marenok, V.M. (2007), «Vplyv gidrodynamichnogo rezhymu obrobky na micnist' granul porystoi' amiacnoi' selitry (PAS)», *Zbirnyk naukovykh prac'*, PP Vyshemyr's'kyj V.S., Herson, pp. 83–85.
4. *Marchev's'kyj, V.M. and Grobovenko, Ja.V.* (2013), «Proces sushinnja napovnjuvacha paperovogo polotna», *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu Ukraïny «KPI»*, Serija *Himichna inzhenerija ekologija ta resursozberezhennja*, No. 1.
5. *Marchev's'kyj, V.M. and Grobovenko, Ja.V.* (2016), «Proces sushinnja dioksydu tytanu», *Mizhnarodnyj naukovyj zhurnal*, No. 5, pp. 22–25.
6. *Marchev's'kyj, V.M. and Grobovenko, Ja.V.* (2016), «Proces sushinnja dioksydu tytanu», *Mizhnarodnyj naukovyj zhurnal*, No. 5 (2), pp. 22–24.
7. *Malahov, M.M., Djachenko, S.V., Papush, E.G. and Klymenchuk, O.A.* (2005), «Matematychna model' sushinnja dyspersnyh produktiv v aktyvnomu gidrodynamichnomu shari», *Visti vyshhyh navchal'nyh zakladiv*, Serija *Harchova tehnologija*, No. 2–3, pp. 97–102.
8. *Ivanov, I.G.* (2012), *Sushka melkodispersnyh materialov v kipjashhem sloe*, Jenergija, Moskva, 126 p.
9. *Aleksanjan, I.Ju., Titova, L.M. and Nugmanov, A.H.* (2014), «Modelirovanie processa sushki dispersnogo materiala v kipjashhem sloe», *Tehnika i tehnologija pishhevyh proizvodstv*, No. 3 (34), pp. 96–100.
10. *Dmitriev, V.M. and Sergeeva, E.A.* (2013), «Konvektivnaja sushka polidispersnyh materialov v apparatah zakruchennogo vzveshennogo sloja», *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, No. 3, pp. 602–606.

**Марчевський** Віктор Миколайович – кандидат технічних наук, професор кафедри машин і апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- тепломасообмінні процеси в хімічній промисловості;
- апаратне забезпечення хімічних процесів.

E-mail: v.m.marchesky@gmail.com.

**Гробовенко** Ярослав Віталійович – асистент кафедри машин і апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- моделювання процесів тепломасообміну;
- сушильне обладнання для дисперсних матеріалів.

E-mail: ygrobobenko@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2018.