

9. Медик, М. А. Дисперсия продольных волн в стержнях прямоугольного сечения [Текст] / М. А. Медик // Прикладная механика, Москва, Мир. – 1967. – № 3. – С. 145-180.
10. Бондеренко, А. А. Нормальные волны в прямоугольном упругом волноводе [Текст] / А. А. Бондеренко // ISSN 1028-7507 Акустичний висник. – 2007. – Том 10, №4. – С. 12-27.
11. Hayashi, T. Guided wave Dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section [Текст] / T. Hayashi, W. J. Song, J. L. Rose // Ultrasonic's. – 2003. – 41. – P. 175-183.
12. Амензаде, Ю. А. Теория упругости. [Текст] / Ю. А. Амензаде. – Мир, 1979. – 284 с.
13. Doetsch, G. Handbuch der Laplace-Transformation [Text] / G. Doetsch // Birkhauser Basel. – 1950. – Vol. 2. – P. 215-230.
14. Расулова, Н. Б. Распространение волн в призматическом брусе подверженном действию осевых сил [Текст] / Н. Б. Расулова // Изв. РАН, "Механика твердого тела". – 1997. – № 6. – С. 176-179.

**У статті, за допомогою програмного забезпечення ANSYS CFX, розглянуто результати численних досліджень характеру розподілу швидкості руху розплаву в порожнині оболонки (кошика обертового гранулятора) і перед отворами витікання. Аналіз отриманих результатів моделювання, показав можливість вибору варіанту модернізації конструкції обертового вібраційного гранулятора залежно від робочих параметрів, що дозволить поліпшити режим його роботи**

**Ключові слова:** приплювання, радіальні лопаті, загнуті вперед лопаті, відцентровий вібраційний гранулятор, гідродинаміка

**В статтє, с помощью программного обеспечения ANSYS CFX, рассмотрены результаты численных исследований характера распределения скорости движения расплава в полости оболочки (корзины вращающегося гранулятора) и перед отверстиями истечения. Анализ полученных результатов моделирования, показал возможность выбора варианта модернизации конструкции вращающегося вибрационного гранулятора зависимости от рабочих параметров, что позволит улучшить режим его работы**

**Ключевые слова:** приллирование, радиальные лопасти, загнутые вперед лопасти, центробежный вибрационный гранулятор, гидродинамика

УДК: 66.063.6

# АНАЛІЗ ГІДРОДИНАМІКИ В ПОРОЖНИСТІЙ ПЕРФОРОВАНІЙ ОБОЛОНЦІ ВІДЦЕНТРОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГРАНУЛЯТОРА

**М. С. Скиданенко**  
Асистент

Кафедра "Процеси та обладнання хімічних та нафтопереробних виробництв"  
Сумський державний університет  
вул. Римського-Корсокова 2,  
м. Суми, Україна, 40007  
E-mail: skidanenko@pohnp.sumdu.edu.ua

## 1. Вступ

У сучасному сільському господарстві по всьому світу динамічно зростає попит на азотні добрива. На розвиток ринку мінеральних азотних добрив впливають економічні та соціальні тренди розвитку. Зростанню попиту азотних добрив сприяють: проблема продовольчого забезпечення країн; необхідність підтримувати і підвищувати врожайність сільськогосподарських земель, можливості розширення яких велими обмежені; активний пошук відновлюваних джерел енергії та плани розвитку біоенергетики.

У найближчі роки очікується активне інвестування і зростання світових потужностей виробництва мінеральних добрив. У стадії будівництва в даний час знаходяться 250 проектів. Експерти IFA оцінюють загальні витрати з будівництва нових установок в 88 млрд. доларів. Їх реалізація призведе до зростання

виробничих потужностей в 2015 році на 183 млн. т мінеральних добрив (рис. 1) [1].

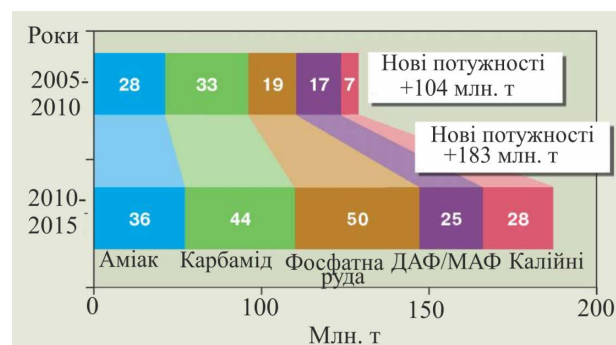


Рис. 1. Збільшення потужності виробництва мінеральних добрив і розмір інвестицій у його розвиток

На регіональному рівні основний приріст споживання добрив припадає на країни Азії та Американського континенту – 59 % і 23 % світового приросту споживання відповідно. З азіатських країн основна частина приросту споживання припадає на країни Південної Азії (Малайзія, Індонезія, Індія, де все більша увага приділяється продовольчій безпеці. У 2015-2020 роках споживання в середньому зростає на 2,5-3 % на рік і досягне 215 млн. т поживних речовин (рис. 2) [1].

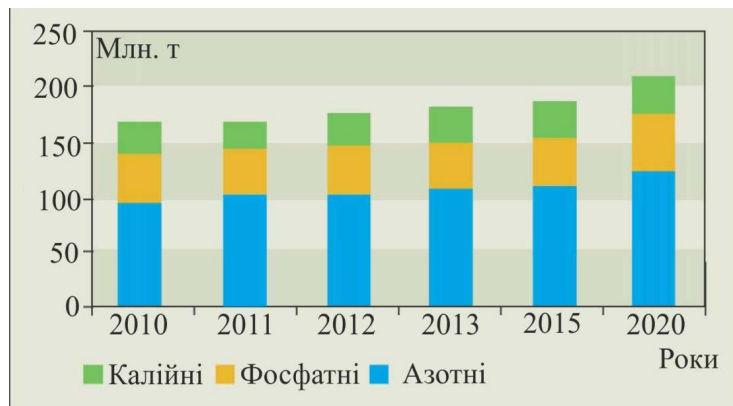


Рис. 2. Прогноз споживання мінеральних добрив у світі, млн. т корм. речовин

У світовій практиці хімічної промисловості найбільш поширеними способами виробництва азотних мінеральних добрив є методи прильовання в баштах і гранулювання (шляхом поширювання розплаву на частинки ретур в киплячому шарі в барабанних або тарілчастих грануляторах) [2]. Спосіб прильовання полягає в розбризкуванні (розпаді струменів на краплі, що випливають з диспергуючого пристрою) в повітряному середовищі розплаву мінеральних добрив, і охолодження сферичних крапель розплаву, що перебувають у вільному падінні, і їх кристалізації в зустрічному потоці охолоджуючого повітря. Кожен з розглянутих способів має переваги і недоліки, проте, як показує світова практика, 70 % азотних добрив виробляються у вигляді прилл [3].

## 2. Аналіз літературних даних

Вежа прильовання являє собою інженерно-технічну споруду висотою 30–114 м і діаметром 8–22 м, в залежності від продуктивності. У нижній частині башти, практично по всьому поперечному перерізу, встановлюється вбудований апарат охолодження прилл в киплячому шарі з підведеними повітроводами і дуттьовими вентиляторами для подачі повітря в апарат охолодження. Над ним передбачаються вікна для подачі додаткової кількості атмосферного повітря, а також, у разі необхідності, монтується направляючий конус. У верхній частині башти є перекриття, в центрі якого розташований пристрій для диспергування розплаву [4].

Для диспергування розплавів використовують кілька видів пристроїв (грануляторів): відцентрові,

статичні і комбіновані - накладення вібрації на відцентрові статичні. Використовуються також відцентрові механічні форсункові гранулятори (застосовуються не часто через великий розкид по гранулометричному складу) [5]. Найбільш поширені у застосуванні - відцентрові гранулятори. Опис принципу дії відцентрового вібраційного гранулятора розміщено в [6]. Основними елементами конструкцій грануляторів розплаву є перфоровані оболонки, які зазвичай володіють осью симетрії. Основним призначенням оболонки є диспергування розплаву на краплі. Проектування диспергуючого пристрою є першим і основним етапом розрахунку процесу гранулювання розплавів в баштах прильовання.

В розробці теоретичних основ роботи порожнистих перфорованих обертових оболонок присвячено чимало праць вчених і дослідників.

Однак до останнього часу, дана теорія не допрацьована. Так, при розрахунку пропускної здатності (продуктивності) таких оболонок пропонувалося використовувати емпіричні залежності, отримані для умов відносного спокою рідини в оболонці [7]. На практиці в багатьох випадках використовуються порожнисті перфоровані обертові оболонки, в яких рідина рухається зі швидкістю, меншою швидкості обертання оболонки [8]. Тому вищезазначені залежності не відображають в цілому фізичну сутність внутрішньої гідродинаміки даних оболонок і можуть застосовуватися лише у випадках, обмежених рамками експериментів. Значний внесок у розвиток теорії порожнистих перфорованих обертових оболонок зробив своїми працями Б. Г. Холін [9, 10]. Ним досліджені закономірності внутрішньої гідродинаміки цих оболонок. Автори [11] доповнили теорію опису внутрішньої гідродинаміки порожнистої перфорованої обертової оболонки, підтвердивши свої пропозиції теоретичними та експериментальними дослідженнями. Однак, викладені гіпотези авторів [9–11] можуть застосовуватися тільки при великих значеннях Рейнольдса:

$$Re = \frac{mR_1}{\mu}, \tag{1}$$

де  $m$  – масова витрата рідини, віднесена до одиниці площі внутрішньої поверхні перфорованої оболонки радіусом  $R_1$ ;  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості.

## 3. Постановка проблеми

На процес утворення монодисперсних крапель і їх кристалізацію значний вплив мають умови формування струменя розплаву, що диспергується (характер витікання з отвору гранулятора і дроблення). Рівномірність витікання струменя рідини визначається характером розподілу швидкості її руху в робочій порожнині гранулятора і перед отвором витікання. На основі розглянутих теоретичних основ роботи по-

рожнистих перфорованих обертових оболонок було розроблено диспергатори (відцентрові вібраційні гранулятори) для виробництва аміачної селітри [2]. Дані прилади дали можливість отримувати продукт наступного гранулометричного складу: масова частка гранул розміром менше 1,0 мм – 0,7–1,5 %, масова частка гранул розміром 1,0–2,0 мм – 3,0–6,0 %, масова частка гранул розміром 2,0–3,0 мм – 80–85 %, масова частка гранул розміром 3,0–4,0 мм – 90–96 %, масова частка гранул розміром більше 4,0 мм – менше 1 % [2].

По росту попиту на мінеральні азотні добрива, для створення конкуренції на ринку збуту, з'являється необхідність підвищення їх монодисперсного складу, що забезпечує підвищення врожайності сільськогосподарських культур, вільну сипучість при використанні і зменшення їх втрат при транспортуванні і відсутність злежування при зберіганні.

Актуальним є вивчення гідродинаміки руху рідини в порожнистій перфорованій оболонки з малим значенням  $Re$ . Необхідно знати характер обертового руху і розподіл швидкостей у розплаву, що заповнює обсяг перфорованої оболонки, що обертається та уточнити (підкоригувати) швидкість витікання струменя розплаву з отворів корзини гранулятора. Це дасть можливість визначати характер розподілу швидкості руху рідини в порожнині оболонки і перед отворами витікання, що дозволить вносити правильні конструктивні рішення для отримання монодисперсного складу продукту.

#### 4. Моделювання гідродинаміки в порожнистій перфорованій оболонці обертового гранулятора

Для зазначеного дослідження та визначення характерних зон руху рідини, було створено твердотілу модель оболонки програмним продуктом «КОМПАС-3D» (<http://ascon.ru/>), та проведено чисельне моделювання течії з використанням програми обчислювальної гідродинаміки ANSYS CFX (<http://www.ansys.ru/>). Для розрахункової області була створена структурована розрахункова сітка в програмі ICEM CFD. Для коректного моделювання умов роботи пристрою використовувалася двозв'язна розрахункова область, що складається з корпусу і корзини (рис. 3).

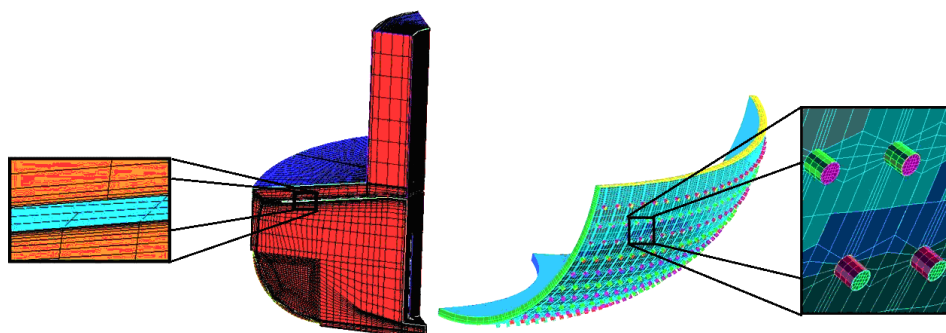


Рис. 3. Розрахункова сітка для моделювання гідродинаміки

Розрахунок параметрів руху рідини виконаний шляхом чисельного рішення системи рівнянь, що описують загальний випадок руху рідкого середовища –

усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса і нерозривності [12].

При моделюванні було зроблено ряд припущень:

- 1) ставиться вісесиметричне завдання – розглядається рух рідини в одному секторі;
- 2) при побудові моделі розглядалася гідродинаміка в нижній частині оболонки (кошику) перед отворами витікання;
- 3) при вісесиметричному завданні розглядається обтікання однієї лопаті, яка знаходиться в центрі сектора з кутом  $360^\circ/n$ , де  $n$  – кількість лопаток.

#### 5. Завдання граничних умов

Чисельний експеримент проводився при стаціонарній постановці завдання (Steady State). Постановка граничних умов для розрахункових областей були реалізовані за наступною схемою рис. 4.

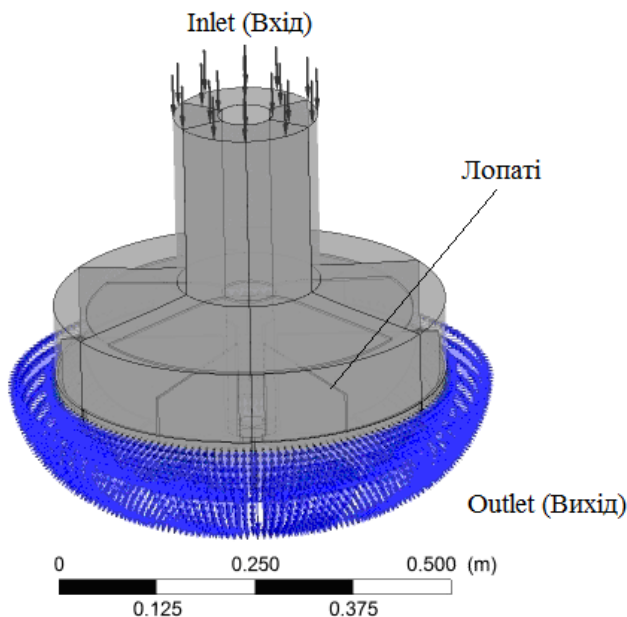


Рис. 4. Схема завдання граничних умов для задачі

На поверхні Inlet, через яку потік потрапляє в розрахункову область, задавалося значення витрати, відповідне виробничому режиму роботи гранулятора. Оболонка гранулятора обертається навколо своєї осі. Під дією відцентрової сили, з отворів (Outlet), відбувається витікання рідини в повітряне середовище, в якій задавалося значення тиску,

що відповідає умовам модельованого експерименту. Під час експерименту змінювалася частота обертання гранулятора, кількість лопатей і їх форма.

Критерієм збіжності розрахунку було встановлення інтегральних характеристик потоку при досягненні значення величини середньоквадратичних нев'язок за основними параметрами на рівні  $(1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-6})$  [13].

### 6. Результати комп'ютерного моделювання

Отримані результати чисельного моделювання гідродинаміки потоку пристрою без лопатей показують, що основна маса рідини, за винятком дуже тонкого прикордонного шару, прилеглого до внутрішньої поверхні оболонки (рис. 5), рухається з великим відставанням від оболонки. У кожен окремий проміжок часу в області отвору витікання буде знаходитися деяка нова кількість рідини. За цей час за рахунок надлишкового тиску передається імпульс у напрямку осі отвору. У цей момент відбувається витікання рідини з отвору. Радіальна складова швидкості рідини, яка не встигла увійти в отвір, в наступний момент часу знову стає рівною нулю, так як рідина потрапляє в зону неперфорованої частини стінки оболонки. Потім, при підході нового отвору до розглянутої області рідини, закінчиться наступна порція. Оскільки маса рідини володіє інерцією, то радіальна складова швидкості буде збільшуватися в часі від нуля на передній по ходу руху вхідній кромці отвору до деякого максимуму на протилежному краю отвору витікання. Надмірний тиск в оболонці гранулятора малий, отже, мале і значення імпульсу сили в напрямку осі отвору. При збільшенні швидкості обертання оболонки час перебування рідини над отвором зменшується, при цьому тиск в ній зростає не суттєво. Рідина по інерції у відносному русі як би пролітає над отвором, не встигаючи заповнити його.

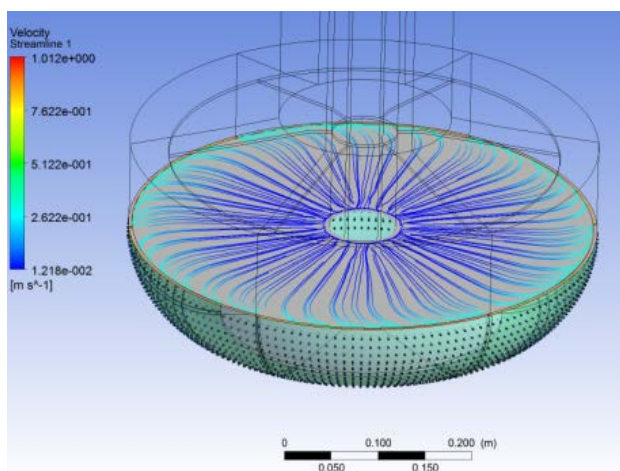


Рис. 5. Лінії струму рідини для обертального гранулятора зі швидкістю обертання 50 об/хв без лопатей

Для отримання монодисперсних гранул і можливості підвищення продуктивності і поліпшення розподілу навантаження було запропоновано розташувати в кошику гранулятора напірні лопаті з зазо-

ром, які повторюють форму перфорованого днища, і обертаються разом з корпусом гранулятора. Було здійснено чисельне моделювання роботи гранулятора з радіальними, загнутими вперед і загнутими назад лопатями. Перегородки призводять розплав в обертання, завдяки чому зростає відцентровий натиск і збільшується швидкість закінчення струменів з отворів кошика.

На першому етапі досліджувався вплив кількості радіальних лопатей (від 4 до 7) на швидкість витікання при постійних початкових умовах. За результатами моделювання, як видно за графіком на рис. 6, при збільшенні кількості лопатей спостерігається збільшення абсолютної швидкості і тиску.

Для пояснення отриманих залежностей розглянемо фізику процесу. Припустимо ідеальний випадок, коли гранулятор складається з нескінченного числа нескінченно тонких лопатей. У такому випадку, траєкторія потоку рідини повністю повторює траєкторію лопатей. У реальності, при зменшенні кількості лопатей в каналі між лопатями отримуємо у відносному русі обертання рідини в бік, зворотний обертання кошика гранулятора. Вихровий відносний рух рідини в каналі між лопатами володіє швидкостями, що збігаються за напрямком з основним потоком з всмоктуючого боку лопаті і швидкостями зворотними по напрямку до основного потоку, з напірної сторони лопаті. Осьовий вихор переносить до підвищення відносних швидкостей на всмоктувальній стороні і до зниження їх на напірній (рис. 7).

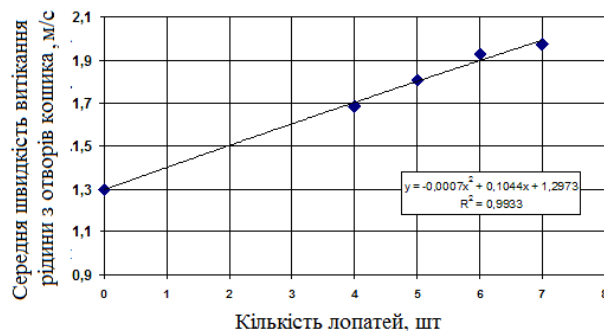


Рис. 6. Залежність середньої швидкості витікання рідини з отворів кошика гранулятора від кількості радіальних лопатей при частоті обертання корзини 50 об/хв

Отже, чим менша кількість лопатей буде знаходитися в кошику гранулятора, тим більше буде швидкість на напірній стороні лопаті, а, отже, зменшиться швидкість витікання рідини з отворів. Дане припущення підтверджується рівнянням теоретичного напору з урахуванням кінцевого числа лопатей за схемою Стодоли-Майзеля [14]:

$$H_T = \frac{\omega}{g} \left[ r_2^2 \left( 1 - \frac{\pi \cdot \sin \beta_2}{z} \right) \omega - \frac{Q}{2\pi b_2 \psi_2 \tan \beta_2} - (r_{c_u})_1 \right], \quad (1)$$

де  $z$  – кількість лопатей;  $\beta_2$  – кут виходу лопаті.

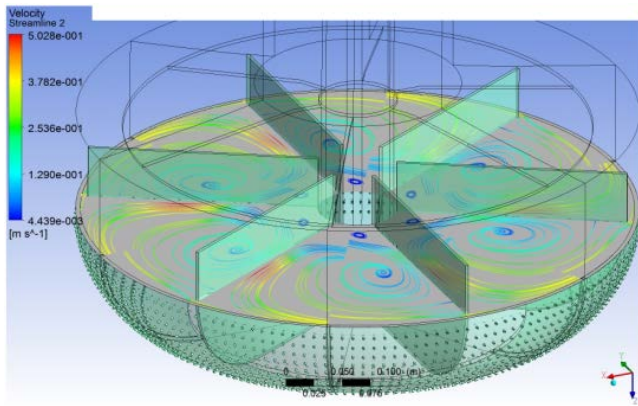


Рис. 7. Лінії струму рідини обертового гранулятора зі швидкістю обертання 50 об/хв з 6-ма радіальними лопатями

Зазначене рівняння не несе кількісного навантаження, воно тільки показує якісну характеристику впливу кількості лопатей на швидкість витікання рідини з отворів.

На другому етапі досліджувалася залежність середньої швидкості витікання рідини з отворів кошика гранулятора. Як бачимо з графіка на рис. 8 при збільшенні частоти обертання гранулятора збільшується середня швидкість витікання рідини згідно лінійної залежності. При розвитку окружної швидкості збільшується і теоретичний напір (1) який, у свою чергу, збільшує значення швидкості витікання рідини з отвору перфорованої оболонки.

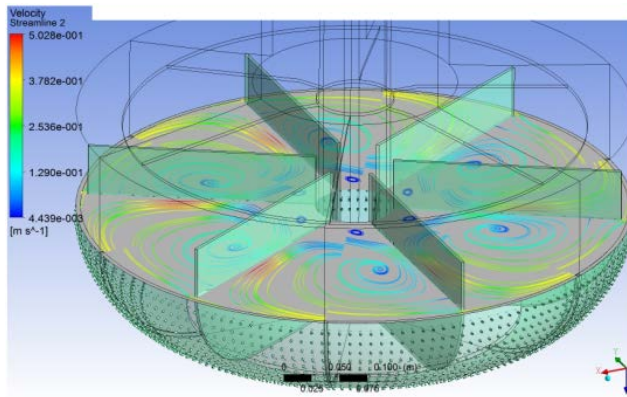


Рис. 8. Залежність середньої швидкості витікання рідини з отворів кошика гранулятора з 6 радіальними лопатями від швидкості обертання кошика

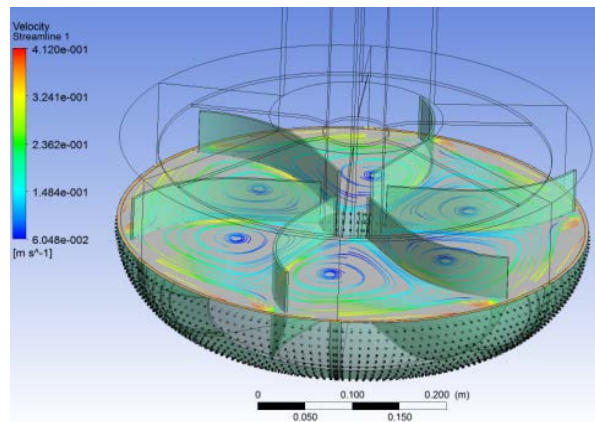
На третьому етапі досліджувалася швидкість витікання рідини з отворів залежно від геометричної форми лопатей. Випробування проводили на радіальних (вихідний кут лопатей 90°) (рис. 9, а) і загнутих вперед (вихідний кут лопатей 135°) лопатях (рис. 9, б) при цьому, вони повторюють форму перфорованого днища кошика. Всі випробування проводилися в однакових умовах.

Як видно з гістограми заміна радіальних лопатей на загнуті вперед на 37 % збільшує швидкість витікання рідини з отворів. Кінетику рідкого середовища в кошику гранулятора можна пояснити, розглянувши трикутник швидкостей рис. 10.

За правилами побудови плану швидкостей абсолютна швидкість  $V_1$  в області лопатей є векторною сумою відносно  $W_1$  й окружної  $U_1$  швидкостей. З плану швидкостей видно, що при використанні радіальної лопаті абсолютна швидкість  $V_1$  менше, ніж при загнутій вперед  $V_2$ .



а



б

Рис. 9. Лінії току рідини обертового гранулятора зі швидкістю обертання кошика 50 об/хв: а – з 6-ма радіальними лопатями; б – з 6-ма загнутими вперед ( $\beta_2=135^\circ$ ) лопатями

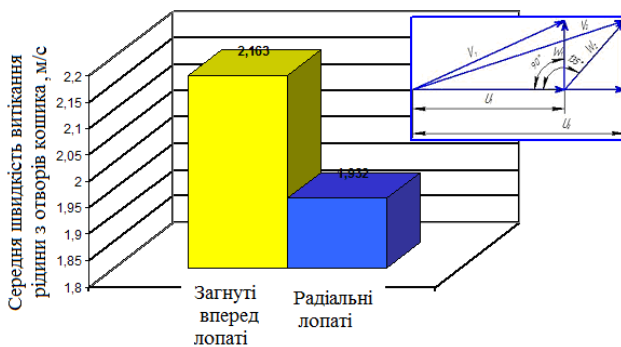


Рис. 10. Середня швидкість витікання рідини з отворів кошика гранулятора при різних формах лопаті і трикутник швидкостей на виході з лопаті

## 7. Висновки

Проведено чисельне моделювання гідродинаміки руху рідини в порожнистій перфорованій оболонці з малим значенням  $Re$  за допомогою програмного продукту ANSYS CFX, яке демонструє характер розподілу швидкості її руху в робочій порожнині гранулятора і перед отвором витікання.

Чисельне дослідження дозволило уточнити (підкоригувати) розрахунок швидкості витікання струменя розплаву та знайти спосіб підвищення швидкості витікання (напору) розплаву з отворів корзини гранулятора, за рахунок модернізації конструкції обертового вібраційного гранулятора:

збільшення кількості лопатей або підібрати геометричну форму лопатей, в залежності від робочих параметрів роботи гранулятора. Зі збільшенням напору зменшується ймовірність забивання та зміни геометричних розмірів отворів витікання. Це дає можливість використовувати гранулятор для диспергування розплавів з твердими домішками (добавками).

Отриманні результати були проаналізовані та застосовані в розробці модифікованого відцентрованого вібраційного гранулятора розплаву азотних добрив та який пройшов дослідно-промислові випробування на агрегаті виробництва аміачної селітри АС-60 ПАТ «Концерн Стирол» [15].

## Література

1. Кудинова, О. Потенциал мирового рынка минеральных удобрений [Текст] / О. Кудинова // The Chemical Journal Химический журнал. – 2012. – № 1-2. – С. 36–39.
2. Чернышев, А. К. Аммиачная селитра: свойства, производство, применение [Текст] / А. К. Чернышев, Б. В. Левин, А. В. Туголуков, и др.; под ред. А. К. Чернышева, А. В. Туголукова. – М., 2009. – 544 с.
3. Production of ammonium nitrate and calcium ammonium nitrate [Text] / EFMA European fertilizer Manufacturers' Association, 2000. – Booklet No. 6 of 8.
4. Кочетков, В. Н. Гранулирование минеральных удобрений [Текст] / В. Н. Кочетков – М. : Химия, 1975. – 224 с.
5. Таран, А. Л. Алгоритм расчета форсуночного гранулятора для производства известково-аммиачной селитры в башнях [Текст] / А. Л. Таран, Е. В. Долгалёв, Ю. А. Таран // Вестник МИТХТ – 2006. – № 3. – С. 42–46.
6. Скиданенко, М. С. Аналіз гідродинаміки стаціонарного витікання струменя [Текст] / М. С. Скиданенко, В. І. Склабинський // Вісник СумДУ. Серія "Технічні науки". – 2013. – № 1. – С. 79–85.
7. Соколов, В. И. Современные промышленные центрифуги [Текст] / В. И. Соколов – М. : Машиностроение, 1967. – 524 с.
8. Холин, Б. Г. К теории движения жидкости в полой перфорированной вращающейся оболочке [Текст] / Б. Г. Холин // Вісник Харківського політехнічного інституту. – 1966. – № 12 (60).
9. Холин, Б. Г. О гидродинамическом парадоксе центрифуги [Текст] / Б. Г. Холин // Интенсификация технических процессов в химической и машиностроительной промышленности. – 1970. – С. 7–13.
10. Холин, Б. Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости [Текст] / Б. Г. Холин. – М. : Машиностроение, 1977. – 182 с.
11. Баранов, Э. И. Обоснование и расчет гидродинамического парадокса, возникающего при истечении жидкости из отверстий перфорированной вращающейся оболочки [Текст] / Э. И. Баранов, С. И. Якушко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – № 4. – С. 7.
12. ANSYS CFX 12.0: Users Manual [Text] / ANSYS Inc., 2007.
13. Хитрых, Д. Модуль Pre/Post ANSYS CFX [Текст] / Д. Хитрых, Д. Плыкин // ANSYS Solutions. Русская редакция – 2006. – № 1. – С. 24–31.
14. Михайлов, А. К. Конструкции и расчет центробежных насосов высокого давления [Текст] / А. К. Михайлов, В. В. Малюшенко. – М. : Машиностроение, 1971. – 304 с.
15. Склабинский, В. И. Эффективность промышленного внедрения модернизированного вращающегося вибрационного гранулятора плава в агрегатах получения аммиачной селитры [Текст] / В. И. Склабинский, Н. П. Кононенко, М. С. Скиданенко // Хімічна промисловість України. – 2013. – № 5. – С. 32–35.