

A. С. РОГОВИЙ, А. О. НЕСКОРОЖЕНИЙ, Є. І. ТИМЧЕНКО, Д. Р. ДЬОМІН

ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ СИПУЧОГО СЕРЕДОВИЩА, ЩО ПЕРЕКАЧУЄТЬСЯ ВИХОРОКАМЕРНИМ ЕЖЕКТОРОМ, ВИКОРИСТАННЯМ ЩІЛІННОЇ ПРИЙМАЛЬНОЇ НАСАДКИ

Проблема зношування механічних рухомих елементів ежекторів при транспортуванні абразивних частинок є актуальною для багатьох галузей промисловості. Покращення показників надійності та довговічності обладнання для перекачування твердих абразивних середовищ можливе шляхом застосування струминних насосів. Особливу увагу заслуговують вихорокамерні ежектори (ВКЕ), ефективність роботи яких можна підвищити шляхом зменшення втрат сипучого середовища у дренажному каналі завдяки використанню щілинної приймальної насадки. Проведене математичне моделювання, засноване на числовому вирішенні усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, що дало змогу встановити залежності втрат сипучого середовища від режимних параметрів функціонування ежектора. До математичної моделі додані рівняння SST (Shear Stress Transport) моделі турбулентності та рівняння нерозривності. Розроблені математичні моделі були підтверджені експериментальними дослідженнями, які продемонстрували їх адекватність і практичну застосовність. Дослідження виявили, що при використанні щілинної приймальної насадки втрати сипучого твердого середовища зменшуються зі зростанням густини середовища, що перекачується. Для циліндричної мінімальної втрати спостерігалися в діапазоні густин 2000–3000 кг/м³. Натомість щілинна насадка забезпечувала менші втрати за умов збільшення густини середовища. Визначено умови зведення до нуля масової витрати твердих частинок у дренажному каналі. Експериментальні дослідження також виявили, що оптимізація параметрів, таких як діаметр і густина твердих частинок, а також повний тиск на вході (ступінь закрутки потоку у вихровій камері), дозволяє практично усунути втрати сипучого середовища у дренажному каналі при використанні щілинної приймальної насадки. Це забезпечує значне підвищення енергоефективності роботи ВКЕ.

Ключові слова: вихорокамерний ежектор, експеримент, числове моделювання, дренажний канал, втрати сипучого середовища, ефективність.

A. ROGOVYI, A. NESKOROZHENYI, Ye. TIMCHENKO, D. DOMIN

REDUCTION OF LOSSES OF THE BULK MEDIUM PUMPED BY THE VORTEX CHAMBER EJECTOR BY USING A SLOTTED INTAKE NOZZLE

The problem of wear of mechanical moving elements of ejectors during the transportation of abrasive particles is relevant for many industries. Improving the reliability and durability of equipment for pumping solid abrasive media is possible by using jet pumps and ejectors. Particular attention should be paid to vortex chamber ejectors (VCE), the efficiency of which can be increased by reducing the loss of bulk media in the drainage channel through the use of a slotted intake nozzle. The mathematical modeling based on the numerical solution of the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations was carried out, which made it possible to establish the dependence of the bulk medium losses on the operating parameters of the ejector. The SST (Shear Stress Transport) equations of the turbulence model and the continuity equation were added to the mathematical model. The developed mathematical models were confirmed by experimental studies that demonstrated their adequacy and practical applicability. The studies have shown that when using a slotted intake nozzle, the losses of bulk solid medium decrease with increasing the pumped medium density. For a cylindrical nozzle, minimal losses were observed in the density range of 2000–3000 kg/m³. Instead, the slotted nozzle provided lower losses with increasing medium density. The conditions for reducing the mass flow rate of solid particles in the drainage channel to zero were determined. Experimental studies have also shown that optimization of parameters such as the diameter and density of solid particles, as well as the total inlet pressure (flow swirl in the vortex chamber), can eliminate the loss of bulk solids in the drainage channel when using a slotted receiving nozzle. This ensures a significant increase in the energy efficiency of the VCE.

Keywords: vortex chamber ejector, experiment, numerical simulation, drainage channel, granular medium losses, efficiency.

Вступ. Зношування проточних частин насосів та ежекторів під час транспортування твердих середовищ, зокрема абразивних частинок, є однією з ключових технічних проблем у гірничодобувній, хімічній, нафтовій та інших галузях промисловості [1]. Робота насосного та компресорного обладнання [2] в умовах підвищеного абразивного зносу призводить до зниження його надійності, частих несправностей і значних витрат на обслуговування та заміну елементів [3]. Зростаючі вимоги до енергоефективності та довговічності систем транспортування твердих середовищ [4] вимагають розробки інноваційних технічних рішень, здатних мінімізувати негативний вплив абразивних частинок на обладнання [5].

Підвищення надійності та довговічності систем для транспортування твердих абразивних середовищ можливе завдяки застосуванню струминних ежекторів [6]. Вони характеризуються високою надійністю та стабільністю роботи, проте їх енергетична ефективність залишається на низькому

рівні. Покращити ефективність функціонування струминних нагнітачів можна шляхом використання аерогідродинамічних властивостей закручених потоків, що утворюються у вихровій камері [7].

Аналіз останніх досліджень. Застосування вихрових ежекторів приводить до низки проблем: низька енергоефективність через великі втрати енергії у вихрових потоках [8]; зношування внутрішніх елементів при роботі з абразивними середовищами [9]; чутливість до властивостей робочого середовища; складність моделювання турбулентних потоків [10] та шумові впливи.

Реалізація ідеї використання впливу відцентрової сили на тверду частинку у вихровій камері вимагає створення додаткового тангенціального каналу виходу змішаного потоку на периферії вихрової камери [11]. Такі струминні нагнітачі, що використовують в якості середовища-носія газ, названі вихорокамерними ежекторами (ВКЕ), мають високі показники ефективності перекачування твердих абразивних

середовищ. Ефективність перекачування твердих частинок за допомогою повітря вдвоє перевищує ефективність перекачування за допомогою класичних прямооточних струминних насосів та ежекторів [12].

ВКЕ мають істотний недолік – використання технологічного дренажного каналу призводить до виникнення втрат середовища в ньому. Ці втрати залежать від кінематичних параметрів закрутки потоку всередині вихрової камери [13], а також від геометричних розмірів камери та каналів. У роботі [14] показані енергетичні характеристики нагнітачів, однак немає згадки про залежність кількості втрат від інших режимних та геометричних параметрів. В цілому, використовуючи одну і ту ж геометрію насоса можна реалізувати два робочі процеси з втратами середовища і без [12]. Робочий процес без втрат буде з меншим ступенем підвищення тиску внаслідок зниження енергетичних параметрів середовища, що перекачується на виході з пристрою.

У попередніх статтях авторів розглянуто втрати перекачуваного середовища в дренажному каналі [7; 8; 12; 14], проте не розглянуто шляхи оцінки цих втрат та фактори, що на них впливають. Використання щільного приймального сопла в тангенціальному каналі виходу насоса дозволяє скоротити втрати, однак вони не зводяться до нуля і, на сьогоднішній день, не виявлено вплив режимних параметрів на величини втрат.

Для того, щоб звести втрати до мінімуму, необхідно оцінити вплив усіх можливих факторів на траєкторії частинок, що складно досягти за допомогою експериментальних досліджень. Сучасний підхід на основі CFD (Computational Fluid Dynamics) методів розрахунку з використанням моделювання руху твердої фази [15] дозволяє зрозуміти, які саме кроки слід задіяти для мінімізації втрат у нагнітачі.

Таким чином, актуальною є задача оцінки втрат потоку в дренажному каналі і виявлення факторів, що впливають на них. Мінімізація втрат перекачуваних потоків може призвести до більшого поширення ВКЕ у промисловості. Також можливе їх застосування за умов обмеження габаритних розмірів, наприклад, у транспортних машинах.

Мета. Метою роботи є підвищення ефективності роботи вихорокамерного ежектора за рахунок зниження втрат сипучого середовища у дренажному каналі шляхом використання щільного приймального насаддя.

Результати досліджень. Схема ВКЕ та його сіткова моделі представлені на рис. 1. Використання відцентрової сили у ВКЕ аналогічне її використанню у відцентровому насосі чи компресорі. У ВКЕ в якості робочого колеса виступає основний потік, що подається в тангенціальний канал входу. Цей потік закручується у вихровій камері та залишає її через технологічний осьовий дренажний канал. Внаслідок закрутки основного потоку виникають гідродинамічні ефекти: надлишковий тиск на периферії вихрової камери та вакуум на її осі. Їх використання дозволяє здійснити передачу енергії пасивному потоку, що надходить у вихрову камеру через осьовий канал

входу. Закручений потік сприяє інтенсивнішому перемішуванню, що використовується, наприклад, у реакційних двигунах або промислових змішувачах, так й у ВКЕ закручений потік дозволяє передати енергію у полі відцентрової сили.

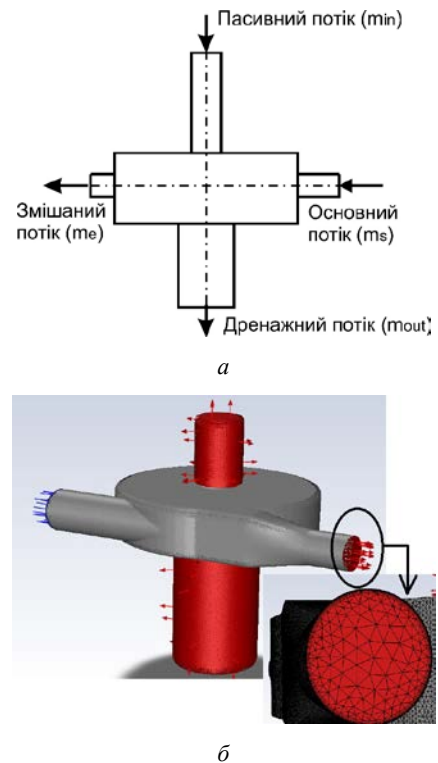


Рис. 1. Геометрія дослідженого ВКЕ:
а – схема нагнітача; б – розрахункова сіткова модель

Потік, що перекачується, всмоктується завдяки вакууму в вихрову камеру, і далі рухається спіральними траєкторіями на периферію вихрової камери, а далі – в тангенціальний канал виходу. Однією з головних переваг таких нагнітачів є те, що вони дуже прості у виготовленні та експлуатації, як і інші пристрої струминної техніки [16]. Струминні ежектори мають простоту виготовлення завдяки своїй конструктивній особливості – відсутності рухомих частин, які потребують високоточної механічної обробки чи складання. Їхня конструкція, зазвичай, утворюється з простих елементів, таких як сопло, змішувальна камера та дифузор, що значно спрощує виробничий процес. Їх легко інтегрувати в існуючі системи завдяки простоті конструкції.

У даному дослідженні як у числовій симуляції, так і для проведення валідації у порівнянні з експериментальними дослідженнями, використовувався ежектор з геометричними розмірами: діаметр вихрової камери – 50 мм, висота – 10 мм, діаметр тангенціального каналу живлення – 8 мм, діаметр вихідного тангенціального каналу – 6 мм, діаметр вхідного осьового каналу – 5 мм, діаметр дренажного осьового каналу – 10 мм. Розміри поперечного перетину прямокутного прийомного щільного каналу – 10 мм на 6 мм.

Математичне моделювання проведено на основі вирішення рівнянь Рейнольдса разом з моделлю

турбулентності SST та поправкою на кривизну ліній течії та обертання потоку у програмному середовищі Ansys Fluent 2024 R1. Рівняння моделі наведено в роботі [17]. Для перевірки незалежності результатів від сіток проводилося порівняння результатів на трьох сітках: 1 млн елементів, 3 млн і 7 млн. Перевірка незалежності результатів від сітки (Grid Independence Check) – це важливий етап числового моделювання, що забезпечує точність та достовірність отриманих результатів. Його мета – визначити, чи зміна кількості елементів сітки впливає на результати обчислень. Такий підхід дозволяє оптимізувати обчислювальні ресурси, забезпечуючи при цьому високу точність моделювання. Так як результати розрахунку на сітках 3 і 7 млн елементів відрізнялися не більше ніж на 1 % подальші розрахунки зроблені на сітках в 3 млн елементів [18].

Моделювання траєкторій твердих частинок проводилося на основі методу Лагранжа шляхом числового вирішення основного рівняння динаміки твердої частинки з урахуванням зіткнень частинок зі стінками камери [19]. Рівняння для визначення траєкторій твердих частинок:

$$x_f = x_i + u_p \delta t$$

де x_i , x_f – початкове та кінцеве положення твердої частинки; u_p – швидкість твердої частинки; δt – крок за часом.

Після завершення обчислень на кожному кроці за часом нова швидкість визначалася згідно рівняння:

$$m \frac{du_p}{dt} = \sum F,$$

де m – маса твердої частинки; $\sum F$ – сума всіх сил, що діють на неї [20]. В даному дослідженні враховувалися: сила лобового опору, сила тяжіння, підйомна сила, сила приєднаної маси рідини, сила впливу градієнта тиску на тверду частинку (в т. ч. Архімедова сила). Розрахунок траєкторій твердих частинок здійснено після знаходження поля швидкості та тиску основної течії повітря в нагнітачі, що істотно скорочує час розрахунку (One-Way Coupled) за достатньої для оцінки витрат твердих частинок.

Картини течії газової та твердої фаз представлені на рис. 2. Порівняння картин течії газу в нагнітачі з твердими частинками і без показує, що концентрація частинок не достатня для серйозного впливу частинок на характеристики течії, і основні параметри роботи нагнітача залишаються незалежними від твердих частинок [1; 7]. Концентрація твердих частинок впливає на моделювання траєкторій у CFD через зміну взаємодії між частинками і середовищем. За низької концентрації домінує односторонній вплив потоку на частинки, тоді як за високої концентрації враховуються міжчастинкові взаємодії, що змінюють турбулентність і розподіл потоку. Це вимагає коректного вибору моделей для точного прогнозування траєкторій.

Представлений на рис. 2, б і 2, в розподіл твердих частинок за діаметром показує миттєве розташування

частинок у просторі в меридіональній і горизонтальній площинах. Розподіл частинок підтверджує на якісному рівні адекватність використаної математичної моделі та відповідає миттєвим картинам течії, що спостерігаються в експерименті.

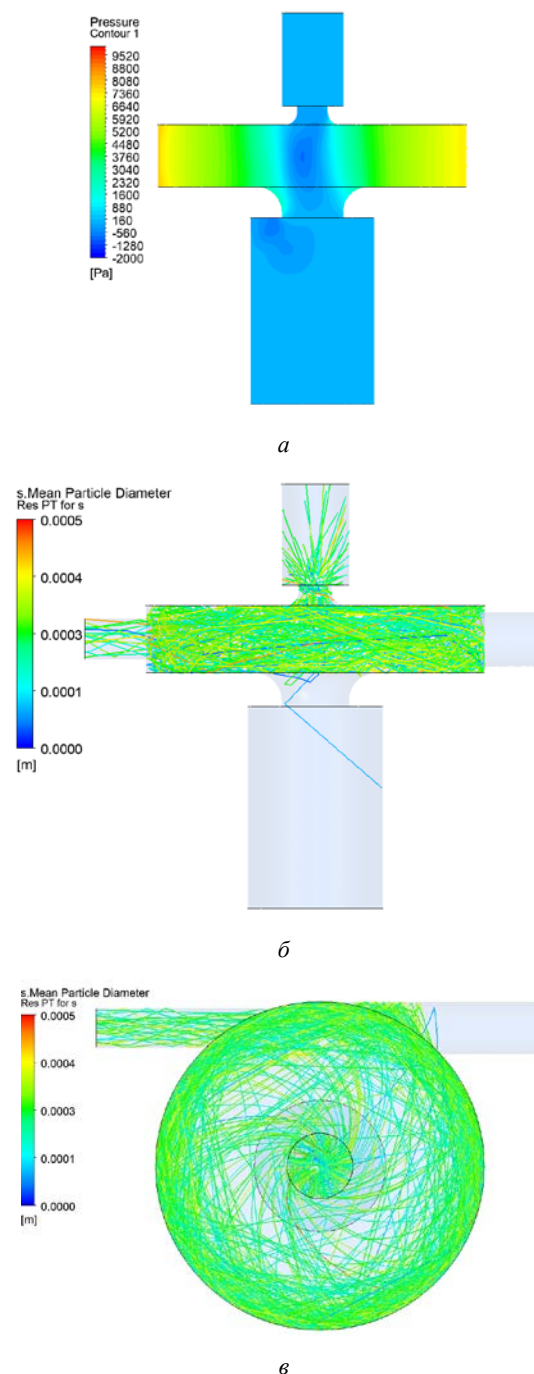


Рис. 2. Результати розрахунку течії у ВКЕ:
а – поле тисків; б – розташування твердих частинок у меридіональній площині; в – розташування твердих частинок у горизонтальній площині

Підтвердження адекватності на якісному рівні передбачає перевірку основних характеристик моделі або процесу шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними або літературними даними. Це включає аналіз схожості

картин течії, зон відриву, траєкторій частинок або розподілу швидкостей і тисків. Такий підхід дозволяє оцінити, чи відтворює модель ключові фізичні особливості, навіть якщо кількісні розбіжності присутні [21]. У результаті розрахунку визначали кількість і масову витрату твердих частинок, що проходять через граничні умови, що давало змогу порівняти масові витрати з експериментом.

За допомогою математичного моделювання траєкторій частинок в нагнітачі вдалося визначити масову витрату втрат перекачуваного середовища. Витрата визначалася шляхом розрахунку кількості частинок, що потрапляють в дренажний канал, по відношенню до загальної кількості твердих частинок. Результати моделювання перевірені експериментальними дослідженнями.

Збільшення загального напору основного потоку призводить до зменшення втрат в дренажному каналі (рис. 3). Масова витрата перекачуваного твердого середовища – m_{in} , масова витрата у тангенціальному каналі виходу – m_{out} .

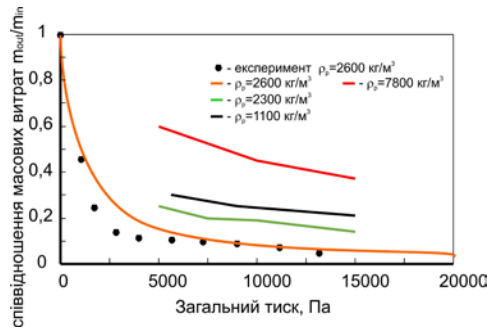


Рис. 3. Порівняння результатів розрахунку та експерименту

При загальному тиску більше 5 кПа результати моделювання добре узгоджуються з експериментом. Однак з меншим тиском спостерігаються певні неточності розрахунку. Але, режим роботи нагнітача за низького загального тиску і, відповідно, при малих числах закрутки не є раціональним і, як правило, не використовується. Втрати перекачуваного потоку мінімальні, якщо густина твердих частинок становить 2000–3000 кг/м³. Значення густини з мінімальним співвідношенням масових витрат пояснюються особливостями передачі енергії частинкам, що перекачуються. При збільшенні густини частинки не встигають набрати швидкість і починають обертатися поблизу осі вихрової камери, що призводить до потрапляння частинки в дренажний канал. Зменшити втрати можна збільшенням висоти вихрової камери або наданням частинкам у вхідному бункері обертального руху.

Для перевірки адекватності використаної математичної моделі проводилася оцінка правильності розрахунку втрат середовища в дренажному каналі. Додаткову складність такої перевірки додає правильна оцінка розподілу розміру твердих частинок в експерименті. Для цього проводився ситовий аналіз шляхом просіювання частинок. На основі просіювання було визначено, що набір твердих частинок задовольняє розподілу Вейбула [22] з параметрами, наведеними в табл. 1.

Частинки були підібрані таким чином, щоб їхня форма була якомога більш сферичною [23]. Розподіл Вейбула задано як початкові умови для розрахунку траєкторій твердого матеріалу.

Таблиця 1 – Розподіл діаметрів твердих частинок, що використано у розрахунках

Загальна масова витрата частинок, кг/с	0,008
Мінімальний діаметр, м	$3 \cdot 10^{-6}$
Максимальний діаметр, м	0,001
Середній діаметр, м	$5 \cdot 10^{-5}$
Модуль розподілу	3,5

Витрата твердих частинок на виході з пристрою має кореляцію з діаметром твердих частинок. На рис. 4 наведено діаграми розподілу відносної частоти часу перебування твердих частинок різного розміру у вихровій камері ежектора.

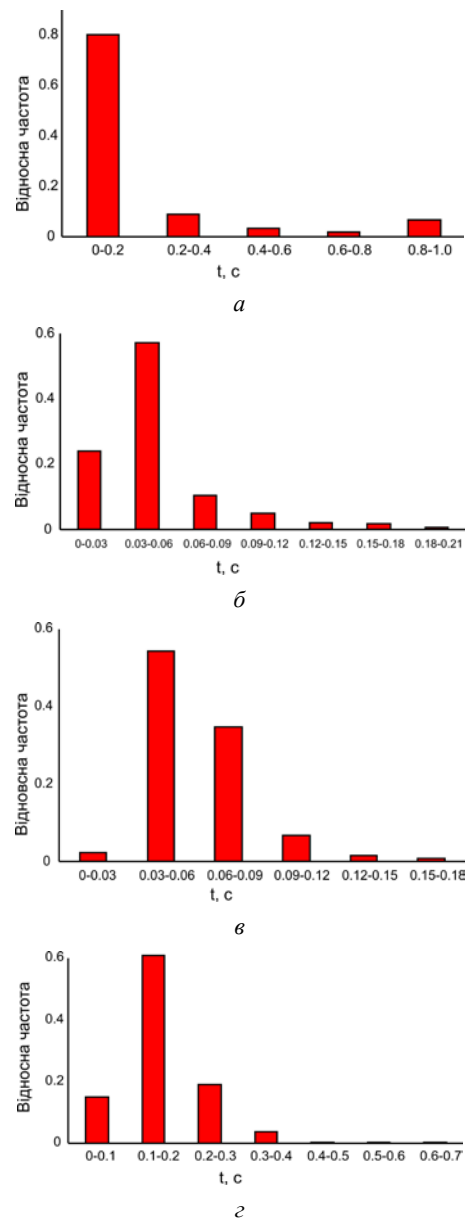


Рис. 4. Відносна частота часу перебування твердої частинки різного розміру d_p у вихровій камері:
 $a - d_p = 1 \cdot 10^{-5}$ м; $б - d_p = 5 \cdot 10^{-5}$ м; $в - d_p = 1 \cdot 10^{-4}$ м;
 $г - d_p = 5 \cdot 10^{-4}$ м

За допомогою рис. 4 можна визначити раціональний розмір твердих частинок для створення максимальної витрати твердого середовища, що забезпечується мінімальним часом знаходження твердої частинки в камері – $d_p = 5 \cdot 10^{-5}$ м або у відносних величинах $\bar{d}_p = d_p / d_{in} \approx 0,01$.

Раціональний розмір частинок можна пояснити тим, що частинки меншого діаметру роблять усередині камери значно більшу кількість обертів через баланс сил під час руху між відцентровою та силою лобового опору. У разі, коли відцентрова сила стає більшою, ймовірність потрапляння частинки в канал виходу стає більшою. Крім того, час перебування твердої частинки в камері впливає на об'ємну та масову концентрацію частинок. Збільшення концентрації призводить до збільшення кількості зіткнень між частинками [24] та зменшення ймовірності потрапляння частинок у вихідний канал, що знижує масову витрату.

Розрахунки на математичній моделі дозволили визначити основні параметри, що впливають на величину втрат: загальний тиск у тангенціальному каналі живлення (ступінь закручення потоку у вихровій камері), діаметр та густина частинок. В результаті варіювання цими параметрами вдалося повністю позбавитися втрат сипучого середовища в дренажному каналі. Визначено, що для того, щоб звести втрати до нуля необхідно, щоб розмір часток був більшим за певний діаметр (табл. 2). Такому результату сприяє насамперед використання щілинного приймального каналу. Використання циліндричного приймального каналу не призвело до повного зникнення втрат середовища. Результати розрахунків зведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Мінімальний розмір частинок для відсутності втрат в дренажному каналі за використання щілинного приймального каналу з прямокутною формою

Загальний тиск живлення	Густина твердих частинок, кг/м ³		
	700	1400	2000
5 кПа	$3 \cdot 10^5$ м	$4 \cdot 10^5$ м	–
7,5 кПа	$2 \cdot 10^5$ м	$2,2 \cdot 10^5$ м	–
10 кПа	$5 \cdot 10^6$ м	$2 \cdot 10^5$ м	–
16 кПа	$7 \cdot 10^6$ м	$1,8 \cdot 10^5$ м	–
21 кПа	$7 \cdot 10^6$ м	$9 \cdot 10^6$ м	$3 \cdot 10^5$ м

З табл. 2 видно, що вдалося позбутися втрат лише за густини менше 2000 кг/м³. Негативний результат для більш високих густин можна пояснити тим, що частинки стають важчими і не встигають придбати швидкість потоку до того, як потрапляють у дренажний канал, а також не можуть у процесі руху повернутися в вихрову камеру.

Результати порівняння розрахунку та експерименту представлені на рис. 5. Щілинний приймальний канал дозволяє значно знизити втрати в дренажному каналі. Крім того, можна вважати, що математична модель адекватно описує течію в нагнітачі. Деяка розбіжність результатів розрахунку та експерименту [25] щодо відносної масової витрати у

дренажному каналі пояснюється тим, що математична модель в цілому, і SST-модель зокрема, з похибкою розраховує значення вакууму поблизу осі [26], що призводить до занижених значень витрати і збільшення втрат у дренажному каналі. Ця проблема проявляється менше зі збільшенням ступеня закручення потоку (динамічного тиску в каналі живлення) у вихровій камері. Крім того, похибка розрахунку може бути результатом впливу похибки визначення діаметрів частинок в експерименті, а також їх несферичності.

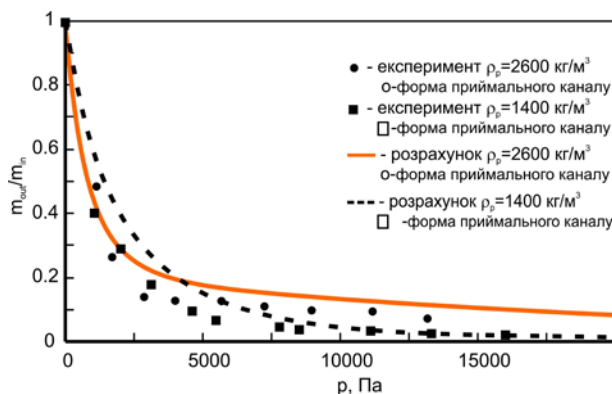


Рис. 5. Порівняння результатів розрахунку та експерименту для прийомних каналів різної форми

На рис. 6 показано порівняння співвідношень масових витрат у дренажному каналі від густини робочого середовища. На відміну від циліндричного приймального каналу, де мінімальні втрати спостерігаються для густини 2000–3000 кг/м³, для щілинного відбувається зменшення втрат зі збільшенням густини середовища, що перекачується.

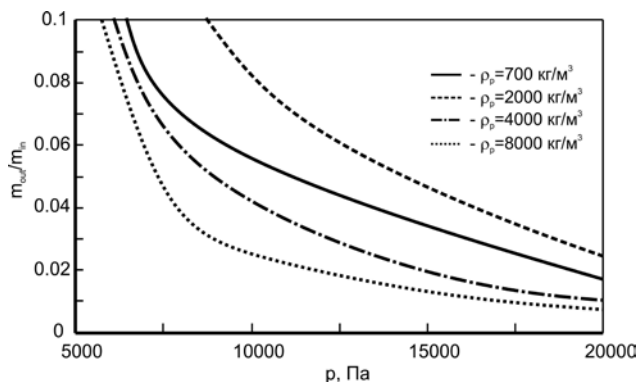


Рис. 6. Вплив густини середовища, що перекачується, на масову витрату цього середовища у дренажному каналі за використання щілинного приймального каналу з прямокутною формою

Картини залежностей мають кореляцію з розподілом часток за діаметром та необхідно провести подальші дослідження впливу конкретних розмірів частинок на втрати. Також у цьому дослідженні не враховано вплив турбулентних пульсацій в основній рідині, що, мабуть, може дозволити отримати більш точні результати моделювання з урахуванням осереднення і ймовірнісної оцінки, тому що розмір часток досить малий, й параметри турбулентності можуть впливати на траєкторії частинок.

Висновки. На основі теоретичних числових й експериментальних досліджень підвищено ефективність роботи вихорокамерного ежектора за рахунок зниження втрат сипучого середовища у дренажному каналі шляхом використання щільного приймального насадка.

Шляхом моделювання траєкторій руху твердих частинок у вихровій камері ВКЕ визначено їх вид, характеристики та залежність від розміру частинок, масові витрати твердих частинок у різних каналах ВКЕ.

Проаналізовано вплив розміру твердої частинки на час її перебування у вихровій камері, що дозволило визначити раціональний розмір твердих частинок для створення максимальної витрати твердого середовища.

Визначено умови зведення до нуля масової витрати твердих частинок у дренажному каналі ВКЕ: забезпечення певного співвідношення діаметру та густини частинки та використання щільного приймального каналу з прямокутною формою.

Визначено вплив густини твердих частинок та повного тиску в каналі живлення на масову витрату твердих частинок у дренажному каналі ВКЕ.

Список літератури

- Singh J., Vasudev H., Chohan J. S. Review on computational fluid dynamics based analysis of surface erosion in hydraulic machinery. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2023. Vol. 18. P. 5353–5380. doi: 10.1007/s12008-023-01336-2
- Antonenko S., Sapozhnikov S., Kondus V., Chernobrova A., Mandryka A. Creation a universal technique of predicting performance curves for small-sized centrifugal stages of well oil pump units. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741, 012011. doi: 10.1088/1742-6596/1741/1/012011
- Фатєєва Н. М., Шевченко Н. Г., Фатєєв О. М. Надійність гідропневоагрегатів металорізального устаткування. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. No. 41 (1213). P. 84–87.
- Patel M., Kumar A., Pardhi B., Pal M. Abrasive, erosive and corrosive wear in slurry pumps – A review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2020. Vol. 7, issue 3. P. 2188–2195.
- Rogovyi A. Use of detached-eddy simulation method (DES) in calculations of the swirled flows in vortex apparatuses. *Teka. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*. 2016. Vol. 16, no. 3. P. 57–62.
- Momeni H., Domagala M. CFD simulation of transport solid particles by jet pumps. *Technical Transactions*. 2015. Mechanics issue 2-M (7). P. 185–191.
- Роговий А. С. Концепція створення вихорокамерних нагнітачів та принципи побудови систем на їх основі. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Свердловецьк: Вид-во ЧНУ ім. Володимира Даля. 2017. № 3 (233). С. 168–173.
- Rogovyi A., Voronova Ye. Comparative analysis of performance characteristics of jet vortex type superchargers. *Автомобильный транспорт*. 2016. Вып. 38. С. 93–98.
- Baha V., Pitel J., Pavlenko I. Effect of erosion on surface roughness and hydromechanical characteristics of abrasive-jet machining. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 11, issue 2. P. G9–G16. doi: 10.21272/jes.2024.11(2).g2
- Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Makarov V. Optimization of the water passage of a pump-turbine based on a numerical study of its hydrodynamic characteristics. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv, 2019. P. 460–463.
- Сьомін Д. О., Роговий А. С. Вплив умов входу середовища, що перекачується, на енергетичні характеристики вихорокамерних насосів. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2015. No. 3 (1112). P. 130–136.
- Роговий А. С. *Удосконалювання енергетичних характеристик струминних нагнітачів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.17*. Луганськ, 2007. 193 с.
- Brazhenko V., Mochalin I. Numerical simulation and experimental tests of the filter with a rotating cylindrical perforated filter element. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2021. Vol. 235, issue 12. P. 2180–2191. doi: 10.1177/0954406220950346
- Роговий А. С. *Розробка теорії та методів розрахунку вихорокамерних нагнітачів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.17*. Харків, 2017. 364 с.
- Krupa Y., Demchuk Y. Modern software for the numerical study of flow in hydraulic machines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2022. No. 1. P. 54–58.
- Panevnyk D. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz*. 2021. Vol. 77 (9). P. 579–586.
- Rogovyi A., Neskorozenyi A., Krasnikov S., Tynyanova I., Khovanskyi S. Improvement of Vortex Chamber Supercharger Performances Using Slotted Rectangular Channel. *Advanced Manufacturing Processes IV: Selected Papers from the 4th Grabchenko's Int. Conf. on Advanced Manufacturing Processes, InterPartner 2022 (6–9 September 2022, Odessa, Ukraine). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer, 2023. P. 552–561. doi: 10.1007/978-3-031-16651-8_52
- Engel A. *Verification, validation, and testing of engineered systems*. John Wiley & Sons, 2010. 720 p. doi: 10.1002/9780470618851
- ANSYS, C. *R24.1 Help manual*. ANSYS Inc. 2024.
- Sommerfeld M., Sgrot O. L., Taborda M. A., Koullapis P., Bauer K., Kassinos S. Analysis of flow field and turbulence predictions in a lung model applying RANS and implications for particle deposition. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021. Vol. 166. P. 105959. doi: 10.1016/j.ejps.2021.105959
- Ferziger J. H., Perić M. *Computational methods for fluid dynamics*. New York: Springer, 2002. 596 p.
- Papoulis A., Pillai S. U. *Probability, random variables, and stochastic processes*. Tata McGraw-Hill Education, 2002. 849 p.
- Córcoles J. I., Acosta-Iborra A., Almendros-Ibáñez J. A., Sobrino C. Numerical simulation of a 3-D gas-solid fluidized bed: Comparison of TFM and CPFD numerical approaches and experimental validation. *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32, issue 10. P. 3689–3705.
- Fan Z., Liu D., Liang C., Chen X. Numerical simulation of collision dynamics between a dry particle and a liquid-coated wet particle. *Powder Technology*. 2024. Vol. 434. P. 119308.
- Rezvaya K., Cherkashenko M., Drankovskiy V., Tynyanova I., Makarov V. Using mathematical modeling for determination the optimal geometric parameters of a pump-turbine water passage. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2020, Istanbul)*. Istanbul: IEEE, 2020. P. 212–216. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263139
- Arolla S. K., Durbin P. A. A rotation/curvature correction for turbulence models for applied CFD. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*. 2014. Vol. 14, issue 6. P. 341–351.

References (transliterated)

- Singh J., Vasudev H., Chohan J. S. Review on computational fluid dynamics based analysis of surface erosion in hydraulic machinery. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2023, vol. 18, pp. 5353–5380. doi: 10.1007/s12008-023-01336-2
- Antonenko S., Sapozhnikov S., Kondus V., Chernobrova A., Mandryka A. Creation a universal technique of predicting performance curves for small-sized centrifugal stages of well oil pump units. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1741, 012011. doi: 10.1088/1742-6596/1741/1/012011
- Fatieieva N. M., Shevchenko N. H., Fatyeyev O. M. Nadiynist' hidropnevoahrehativ metalorizal'noho ustatkuvannya [Reliability of hydropneumounits of metal-cutting equipment]. *Bulletin of the*

- National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 41 (1213), pp. 84–87.
4. Patel M., Kumar A., Pardhi B., Pal M. Abrasive, erosive and corrosive wear in slurry pumps – A review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2020, vol. 7, issue 3, pp. 2188–2195.
 5. Rogovyi A. Use of detached-eddy simulation method (DES) in calculations of the swirled flows in vortex apparatuses. *Teka. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*. 2016, vol. 16, no. 3, pp. 57–62.
 6. Momeni H., Domagala M. CFD simulation of transport solid particles by jet pumps. *Technical Transactions*. 2015, Mechanics issue 2-M (7), pp. 185–191.
 7. Rogovyi A. S. Kontsepsiya stvorenniya vykhorokamernykh nahnitachiv ta pryntsyppu pobudovy system na yikh osnovi [The concept of vortex chamber superchargers creation and the principle of systems designing on their basis]. *Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalya* [Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university]. Severodonetsk, SNU named after Volodymyr Dahl Publ., 2017, no. 3 (233), pp. 168–173.
 8. Rogovyi A., Voronova Ye. Comparative analysis of performance characteristics of jet vortex type superchargers. *Avtomobil'nyy transport*. 2016, issue 38, pp. 93–98.
 9. Baha V., Pitel J., Pavlenko I. Effect of erosion on surface roughness and hydromechanical characteristics of abrasive-jet machining. *Journal of Engineering Sciences*. 2024, vol. 11, issue 2, pp. G9–G16. doi: 10.21272/jes.2024.11(2).g2
 10. Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Makarov V. Optimization of the water passage of a pump-turbine based on a numerical study of its hydrodynamic characteristics. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv, 2019, pp. 460–463.
 11. Syomin D. O., Rogovyi A. S. Vplyv umov vkhodu seredovyshcha, shcho perekachuyet'sya, na enerhetychni kharakterystyky vykhorokamernykh nasosiv [The influence of the inlet conditions of the pumped medium on the energy characteristics of vortex chamber pumps]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 3 (1112), pp. 130–136.
 12. Rogovyi A. S. *Udoskonaluvannya enerhetychnykh kharakterystyk strumynnykh nahnitachiv: dis. ... kand. tekhn. nauk 05.05.17* [Improving the energy characteristics of jet blowers. Candidate eng. sci. diss (Ph. D.)]. Lugansk, 2007. 193 p.
 13. Brazhenko V., Mochalin I. Numerical simulation and experimental tests of the filter with a rotating cylindrical perforated filter element. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2021, vol. 235, issue 12, pp. 2180–2191. doi: 10.1177/0954406220950346
 14. Rogovyi A. S. *Rozrobka teorii ta metodiv rozrakhunku vykhorokamernykh nahnitachiv: dys. ... d-ra tekhn. nauk 05.05.17* [Development of the theory and designing methods of vortex chamber superchargers. Dr. eng. sci. diss.]. Kharkiv, 2017. 364 p.
 15. Krupa Y., Demchuk Y. Modern software for the numerical study of flow in hydraulic machines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 1, pp. 54–58.
 16. Panevnyk D. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz*. 2021, vol. 77 (9), pp. 579–586.
 17. Rogovyi A., Neskorozenyi A., Krasnikov S., Tynyanova I., Khovanskyi S. Improvement of Vortex Chamber Supercharger Performances Using Slotted Rectangular Channel. *Advanced Manufacturing Processes IV: Selected Papers from the 4th Grabchenko's Int. Conf. on Advanced Manufacturing Processes, InterPartner 2022 (6–9 September 2022, Odessa, Ukraine). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, Springer Publ., 2023, pp. 552–561. doi: 10.1007/978-3-031-16651-8_52
 18. Engel A. *Verification, validation, and testing of engineered systems*. John Wiley & Sons Publ., 2010. 720 p. doi: 10.1002/9780470618851
 19. *ANSYS, C. R24.1 Help manual*. ANSYS Inc. 2024.
 20. Sommerfeld M., Sgrott O. L., Tabor M. A., Koullapis P., Bauer K., Kassinos S. Analysis of flow field and turbulence predictions in a lung model applying RANS and implications for particle deposition. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021, vol. 166, p. 105959. doi: 10.1016/j.ejps.2021.105959
 21. Ferziger J. H., Perić M. *Computational methods for fluid dynamics*. New York, Springer Publ., 2002. 596 p.
 22. Papoulis A., Pillai S. U. *Probability, random variables, and stochastic processes*. Tata McGraw-Hill Education Publ., 2002. 849 p.
 23. Córcoles J. I., Acosta-Iborra A., Almendros-Ibáñez J. A., Sobrino C. Numerical simulation of a 3-D gas-solid fluidized bed: Comparison of TFM and CPFD numerical approaches and experimental validation. *Advanced Powder Technology*. 2021, vol. 32, issue 10, pp. 3689–3705.
 24. Fan Z., Liu D., Liang C., Chen X. Numerical simulation of collision dynamics between a dry particle and a liquid-coated wet particle. *Powder Technology*. 2024, vol. 434, p. 119308.
 25. Rezvaya K., Cherkashenko M., Drankovskiy V., Tynyanova I., Makarov V. Using mathematical modeling for determination the optimal geometric parameters of a pump-turbine water passage. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2020, Istanbul)*. Istanbul, IEEE Publ., 2020, pp. 212–216. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263139
 26. Aroila S. K., Durbin P. A. A rotation/curvature correction for turbulence models for applied CFD. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*. 2014, vol. 14, issue 6, pp. 341–351.

Надійшла (received) 25.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Роговий Андрій Сергійович (Rogovyi Andrii) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6057-4845>; e-mail: asrogovoy@ukr.net

Нескорозжений Артем Олегович (Neskorozenyi Artem) – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, аспірант кафедри «Деталі машин і теорії механізмів і машин»; м. Харків, Україна; e-mail: nao@m-impex.com.ua

Тімченко Євген Ігорович (Timchenko Yevhen) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; e-mail: yevhen.timchenko@mit.khpi.edu.ua

Дьомін Данійл Русланович (Domiin Daniil) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0314-1191>; e-mail: daniil.domiin@mit.khpi.edu.ua