

A. С. РОГОВИЙ, С. І. ЛУК'ЯНЕЦЬ

КІНЕМАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ТЕЧІЇ НАФТИ У ВИХОРОКАМЕРНОМУ НАСОСІ

Складні умови експлуатації насосів для перекачування нафти вимагають від гідравлічних машин високих показників надійності, довговічності та ефективності. Розчинений у нафті газ приводить до виникнення у проточних частинах насосів областей зі змінною густиною та до зриву характеристик. Використання струминних насосів обмежене внаслідок низьких показників коефіцієнту корисної дії (ККД). Тому, експлуатація нових типів струминних насосів – вихорокамерних насосів для видобування та транспортування нафти є цілком перспективним за рахунок збільшення показників ефективності перекачування через використання у цих насосах переваг відцентрових та струминних нагнітачів. З іншої сторони, на сьогоднішній день, будь-яких досліджень з поводження вихорокамерних насосів під час перекачування нафти проведено ще не було. В даній роботі на основі числового розрахунку течії нафти у вихорокамерному насосі отримано кінематичні параметри течії із урахуванням та без урахування розчиненого газу у нафті. Розрахунок здійснено на основі вирішення рівнянь Рейнольдса, нерозривності та рівнянь Релея-Плессета у програмному комплексі Ansys CFX. Вперше для вихорокамерного насоса під час перекачування нафти отримані розподіли швидкості нафти та розчиненого газу, розподіли об'ємних та масових концентрацій, графіки розподілів швидкостей в різних горизонтальних площинах вихрової камери, що дозволяє врахувати кінематичні параметри течії у вихрової камері для подальшого оптимального проектування вихорокамерних насосів. Вперше на основі числових досліджень підтверджено можливість використання вихорокамерних насосів для перекачування нафти. При цьому ККД складає приблизно 15 %, що майже вдвічі перевищує ККД прямооточних струминних насосів, що використовуються для цієї мети. Вибір моделі, за якою відбувається розрахунок числовими методами, значно впливає на точність розрахунку інтегральних характеристик роботи вихорокамерного насоса.

Ключові слова: вихорокамерний насос, нафта, числовий розрахунок, кінематичні параметри, математична модель, розчинений газ.

A. ROGOVYI, S. LUKIANETS

KINEMATIC PARAMETERS OF THE OIL FLOW IN A VORTEX CHAMBER PUMP

The difficult operating conditions of oil pumps require high levels of reliability, durability and efficiency from hydraulic machines. The gas dissolved in oil leads to the appearance of regions with variable density in the pumps flow parts and to a breakdown in performance. The use of jet pumps is limited due to low efficiency. Therefore, the operation of new vortex chamber pumps for oil production and transportation is quite promising due to the increase in pumping efficiency indicators using the advantages of centrifugal and jet technology in these pumps. On the other hand, to date, no studies have been carried out on the behavior of vortex chamber pumps when pumping oil. In this paper, based on the numerical calculation of the oil flow in a vortex chamber pump, the kinematic parameters of the flow are obtained with and without the dissolved gas in the oil. The calculation was made on the basis of solving the Reynolds equations, continuity and Rayleigh-Plesset equations in the Ansys CFX software package. For the first time for the vortex chamber pump when pumping oil, the distributions of the oil velocity and dissolved gas, the distributions of volumetric and mass concentrations, and the graphs of velocity distributions in various horizontal planes of the vortex chamber were obtained, which makes it possible to take into account the kinematic flow parameters in the vortex chamber for further optimal design. For the first time, on the basis of numerical calculations, the possibility of using vortex chamber pumps for pumping oil has been confirmed. At the same time, the efficiency is approximately 15%, which is almost twice the efficiency of direct-flow jet pumps used for this purpose. The choice of the model, according to which the calculation is carried out by numerical methods, has a significant impact on the accuracy of calculating the integral characteristics of the vortex chamber pump operation.

Keywords: vortex chamber pump, oil, numerical calculation, kinematic parameters, mathematical model, dissolved gas.

Вступ. Дефіцит енергоресурсів, що склався в Україні вимагає експлуатації низки родовищ високов'язких нафт із глибиною залягання пластів 1000–3600 м. Ці родовища використовуються неефективно внаслідок відсутності та нераціонального використання глибинно-насосного обладнання. Тому проблема пристосування свердловин, що продукують високов'язкі нафти є досить актуальною, та може бути вирішена за рахунок більш широкого використання струминної техніки та технологій [1].

Струминній техніці притаманні високі показники надійності та довговічності, але й є важливий недолік – низька ефективність передачі енергії між потоками рідин [2]. Покращити ефективність перекачування будь-яких рідин за допомогою струминної техніки можливо поєднанням переваг робочого процесу струминної техніки та лопатевих насосів на основі вихрової камери змішування [3]. Такими пристроями є вихорокамерні нагнітачі, які мають кращі, у порівнянні з класичними прямооточними струминними насосами та ежекторами, показники ефективності робочого процесу [4, 5]. Тому, подальші дослідження вихорокамерних

нагнітачів для перекачування нафти є актуальною задачею, вирішення якої дозволить значно збільшити видобуток нафти на родовищах високов'язкої нафти, де використання іншого глибинно-насосного обладнання приводить до зниження ККД процесу.

Аналіз останніх досліджень. Вихорокамерні нагнітачі (ВКН) досліджуються вже майже сорок років, й вже визначилися межі їх застосування [6]. Ці нагнітачі мають кращі характеристики під час транспортування сипучих середовищ, в тих випадках коли співвідношення густини середовища, яке перекачується, до густини середовища, за допомогою якого перекачують, перевищує декілька тисяч [7]. Але, й під час перекачування середовищ із порівняними густинами їх показники ефективності можуть перевищувати показники прямооточних струминних нагнітачів [3, 5, 7]. В роботі [8] показані оптимальні геометричні параметри вихорокамерного насоса, але ці дослідження були проведені для ньютонівських рідин без урахування можливого вмісту розчиненого в них газу. В роботі [9] показані можливі шляхи мінімізації втрат середовища, що перекачується в дренажному каналі ВКН під час

реалізації відповідного робочого процесу, але в роботі не розглянуто особливості перекачування крапельної рідини та рідин із властивостями, притаманними нафті. В роботі [10] розглянуто особливості перекачування за допомогою ВКН ньютонівських рідин із високою в'язкістю, Бінгамівських рідин, але властивості нафти мають низку відмінностей від діапазонів зміни в'язкості, описаних в цій статті. Таким чином, ВКН є насосами, що можуть використатися для перекачування рідин із високими показниками в'язкості, але будь-яких досліджень їх характеристик під час перекачування нафти, на сьогоднішній день проведено не було.

Мета. Метою роботи є дослідження та визначення кінематичних параметрів течії у вихорокамерних насосах під час перекачування нафти розрахунковим шляхом для подальшого створення оптимальної конструкції насоса.

Результати досліджень. В останні роки струминна техніка все більше і більше використовується у промисловості. Так, у нафтогазовидобутку струминні апарати часто встановлюють у комбінації з електровідцентровими насосами й вони працюють на газоводонафтовій суміші. Є декілька причин використання струминної техніки у нафтових свердловинах: встановлення струминного ежектора вище динамічного рівня свердловини дозволяє забезпечити стабілізацію подачі електровідцентрового насоса; відбір нафтового газу з затрубного простору свердловини, що полегшує підймання продукції на поверхню [11].

Газ, що перекачується у нафтогазових струминних насосах/ежекторах досить добре розчиняється у нафті, а повітря, що перекачується, погано розчиняється у воді. У зв'язку з цим необхідно дослідити, як розчинність газу в робочій рідині впливає на роботу струминного насоса нового типу – вихорокамерного насоса.

Тому що в даній статті описані перші дослідження вихорокамерних насосів під час перекачування нафти, то доцільність використання даного типу струминних насосів визначена на основі порівняння інтегральних характеристик перекачування зі струминними насосами прямооточного типу, що серійно виробляються промисловістю та використовуються у реальних умовах нафтовидобутку.

В якості прототипу обрано струминний насос – НСФБ 39/45. Для якісного порівняння характеристик досліджено та спроектовано вихорокамерний насос за методикою розрахунку, описаною в [12]. Для адекватного порівняння діаметр горла активного потоку ВКН виконувався рівним діаметру горла активного потоку у насосі-прототипі. Загальний вигляд спроектованого насоса наведено на рис. 1.

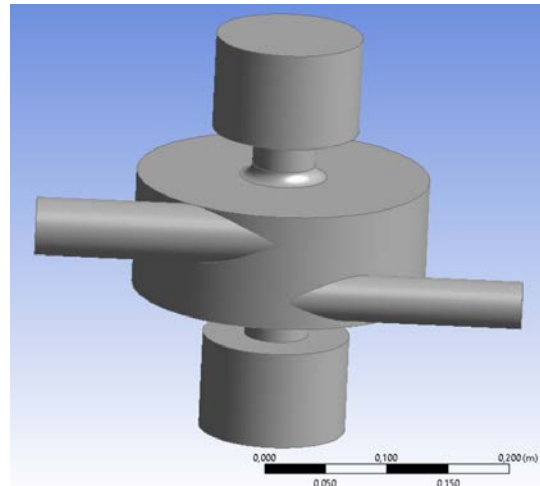
Основні геометричні розміри ВКН: діаметр тангенціального каналу входу 39 мм; діаметр вихрової камери 240 мм. Інші геометричні параметри розраховано на основі безрозмірних співвідношень, що наведені в методиці [12].

Дослідження проведено на основі числового

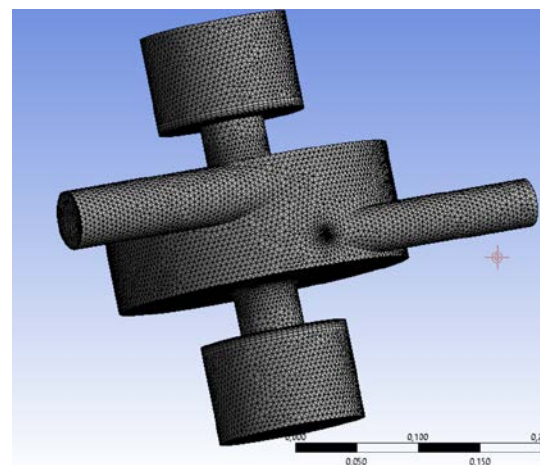
розрахунку математичної моделі, що складалася з рівнянь Рейнольдса [13], рівняння нерозривності, $k-\epsilon$ моделі турбулентності та рівняння Релея-Плессета. Останнє рівняння використано для розрахунку виділення та зростання пухирців газу у рідині:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + 3 \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f}, \quad (1)$$

де R_B – радіус бульбашки; p_v – тиск в бульбашці; p – тиск навколо бульбашки; ρ_f – густина рідини; σ – коефіцієнт поверхневого натягу; t – час.



а



б

Рис. 1. Досліджений вихорокамерний насос:
а – загальний вигляд; б – сіткова модель

Для порівняння характеристик роботи ВКН та особливостей розрахунку виконано два види розрахунків: перший – суміш нафти та газу із газовмістом 3% без урахування в математичній моделі рівняння Релея-Плессета, тобто без моделі кавітації. Другий розрахунок виконано за вищенаведеною математичною моделлю кавітації.

Основною особливістю роботи ВКН є використання гідродинамічних параметрів закрученої течії: створення надлишкового тиску на периферії вихрової камери та вакуум біля осі. Створення

вакууму біля осі приводить до значного зниження тиску, що може сягати значень менших за тиск насиченої пари. В такому випадку з нафти, або з будь-якої рідини буде виділятися газ та формувати вихрове газове ядро біля осі. Подібний ефект спостерігається в експериментальних дослідженнях багатьох вихрових пристроїв: вихрові труби, вихрові клапани, гідроциклони, вихрові насоси, вихорокамерні насоси та в тому числі й у лопатевих насосах [14]. У лопатевих насосах подібний ефект призводить до значного зниження характеристик лопатевого насоса.

Експериментальні дослідження ефектів газовиділення дуже складні й коштовні тому, що необхідно використовувати високошвидкісні відеокамери та фіксувати зміни течії, які відбуваються в дуже маленький проміжок часу. Визначення швидкостей різними оптичними методами також дуже ускладнюється внаслідок розриву течії та неможливості контролю, яка саме фаза або агрегатний стан середовища присутній в той чи іншій точці [15]. Тому, найбільш доцільним методом дослідження стає числове моделювання, яке потребує використання рідини та газу в розрахунку та одночасного розрахунку двох фаз [16].

Відомо, що помилки розрахунку числовими методами можуть сягати значних значень навіть для простих геометричних об'єктів внаслідок помилок вибору моделі турбулентності, сіткових моделей або відривів потоку від стінок [17]. Помилки розрахунку вакууму біля осі вихрової камери для однофазної рідини можуть сягати 50 % [18]. Тому, зрозуміло, що помилка розрахунку течії двофазного гетерогенного середовища у вихорокамерному насосі може сягати дуже великих значень, але фізика процесу, що відбувається у проточній частині насоса, може бути розрахована цілком адекватно.

Граничні умови розрахунку були наступні: у вхідному тангенціальному каналі задавався динамічний тиск, у вхідних осьових каналах входу – відкрита границя Opening з тиском 96000 Па, що дозволяє рідині як потрапляти у розрахунковий домен, так і залишати його без ускладнення розрахунку. У вихідному тангенціальному каналі задано нульовий тиск. У вхідному каналі задано динамічний тиск. Фізичні властивості рідини для розрахунку: нафта з густиною $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$ та динамічною в'язкістю $\mu = 0,004 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Усі нев'язання рівнянь сходяться дуже повільно й мають коливальний характер, що може вказувати на необхідність розрахунку у нестационарній постановці. Нестационарність процесу може бути викликана нутуванням та прецесією вихрового ядра, що описано у багатьох літературних джерелах [19, 20]. В такому випадку раціональним та більш коректним є нестационарний розрахунок, що буде тематикою подальших досліджень за допомогою числового моделювання. Також у подальшому необхідно перевірити адекватність отриманих результатів розрахунку за допомогою експериментальних досліджень. Обмеження розрахунку, які пов'язані з обмеженням використання Ansys CFX, а саме те, що

розрахункова сітка не може перевищувати 500 тис. елементів призвела до того, що наявність у розрахунковій сітці пірамідальних контрольних об'ємів (піраміда з чотирикутною основою) проковує значну похибку розрахунку тиску та швидкості в таких елементах. Тому сіткова модель дороблялася до тих пір, доки сіткове розбиття не було позбавлене пірамідальних елементів та складалося лише з призм та тетраедрів.

На рис. 2 наведено розподіл параметру прикордонного шару призматичних шарів сітки y^+ , що ілюструє можливість використання тієї або іншої моделі турбулентності. Якщо $y^+ < 3$, то доцільно використати SST-модель турбулентності [21, 22]. В нашому випадку на більшості поверхні вихрової камери цей параметр перевищує значення 50, що може приводити до значних помилок розрахунку за допомогою вищезгаданої моделі турбулентності й в даній роботі використано $k-\epsilon$ модель.

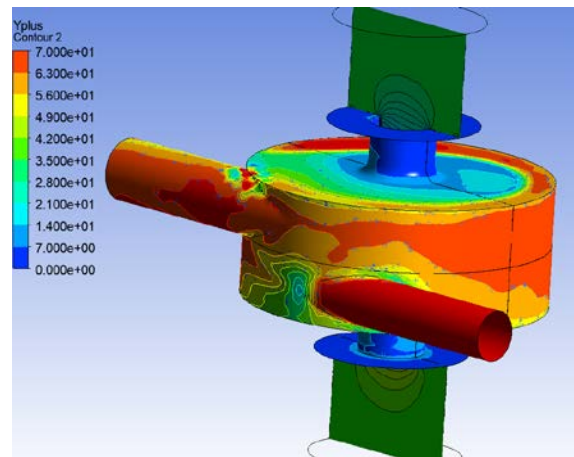
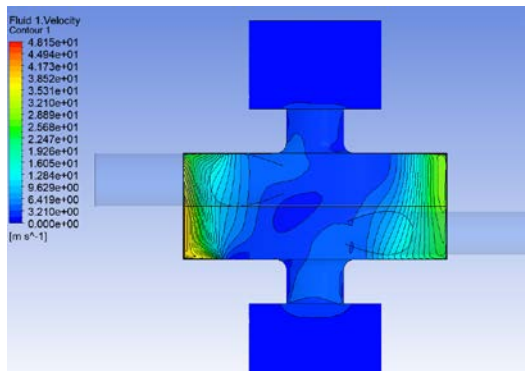


Рис. 2. Розподіл параметру прикордонного шару призматичних шарів сітки y^+

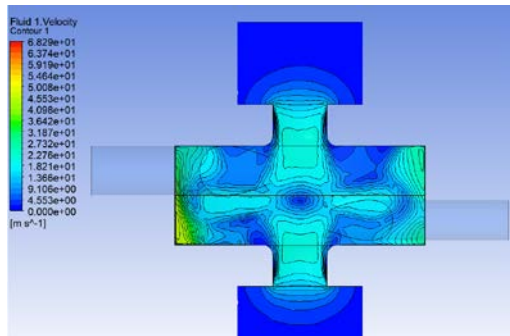
На рис. 3 наведено розподіли швидкостей нафти у проточній частині насоса. Якщо у випадку розрахунку без урахування кавітації картина всмоктування загалом симетрична відносно горизонтальної площини, то у випадку розрахунку з моделлю кавітації можна відзначити симетричність картини течії й відносно горизонтальної площини.

Аналіз результатів розрахунку показує незначну зміну концентрації газу для випадку моделі без урахування кавітації та значне виділення газу з нафти під час розрахунку моделі з кавітацією.

Особливості моделювання двофазної рідини дозволяють дослідити кінематичні параметри руху кожної фази та за результатами розрахунку швидкостей можна констатувати, що неврахування моделі кавітації приводить до того, що концентрація газу в проточній частині ВКН дуже мала й не перевищує 1%, що можна вважати неадекватним результатом, тому що результати фізичних експериментів доводять, що зниження тиску поблизу осі обертання вихрової камери все ж таки приводить до значного виділення газу з рідини. Для подальших розрахунків необхідно використовувати модель Релея-Плесета.



а



б

Рис. 3. Розподіл швидкостей нафти у меридіональній площині насоса:

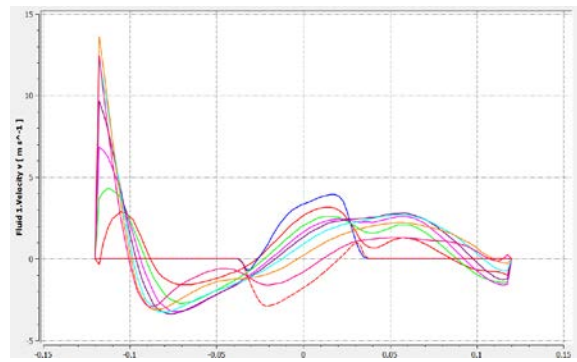
а – без урахування кавітації; б – з урахуванням

На рис. 4 наведено розподіли швидкостей нафти у насосі на різних висотах у вихровій камері за різних моделей.

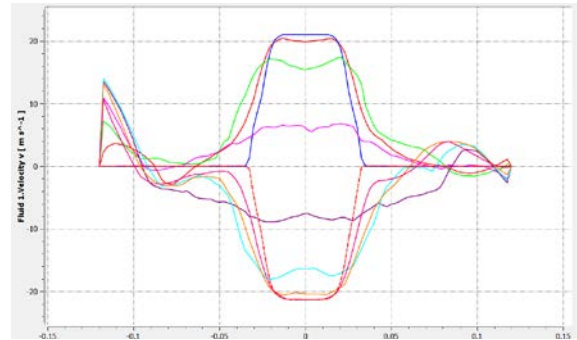
На рис. 5 наведено порівняння розподілів тисків у меридіональній площині вихрової камери для двох випадків: розрахунок з урахуванням моделі кавітації та без урахування.

На рис. 6 наведено розподіл тиску у вихровій камері насоса. Він відповідає другому робочому процесу ВКН, тобто робочий процес без дренажного каналу. Відмінністю розподілів у випадку розрахунку з урахуванням моделі кавітації є наявність зменшення вакууметричного тиску в приосевій зоні, що пов'язане із впливом розчиненого у нафті газу, який виділяється в цій зоні, а, також, збільшеній у порівнянні з однофазною рідиною швидкості руху рідини у приосевій зоні. Також збільшення швидкості можливо пов'язати з тим фактом, що в приосевій зоні, за рахунок збільшення концентрації газу, зменшується густина суміші, що при однаковому перепаді тисків, приводить до збільшення швидкості потоку, що всмоктується та зменшення величини вакууму.

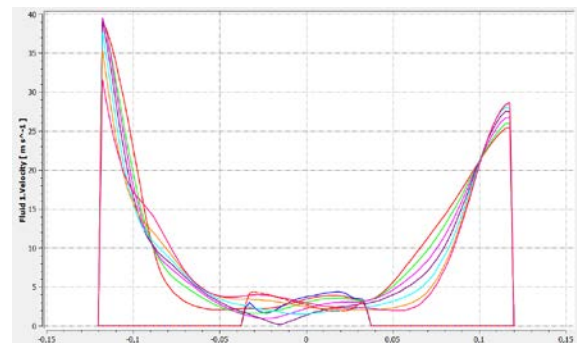
Розрахунок інтегральних параметрів підтвердив, що проблемою отримання картин течії є неспівпадіння результатів розрахунку за різними моделями. Слід зазначити, що значення коефіцієнта корисної дії насоса під час розрахунку за моделлю кавітації (3,8 %) виявився значно меншим ніж за розрахунком без урахування моделі кавітації (14,4%). Це можна пояснити виділенням газу з нафти, що утворює проблеми всмоктування нафти у насос.



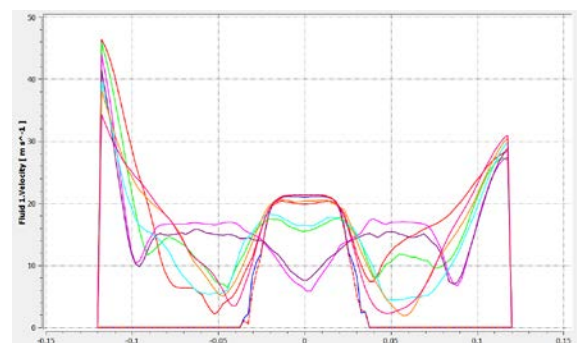
а



б



в



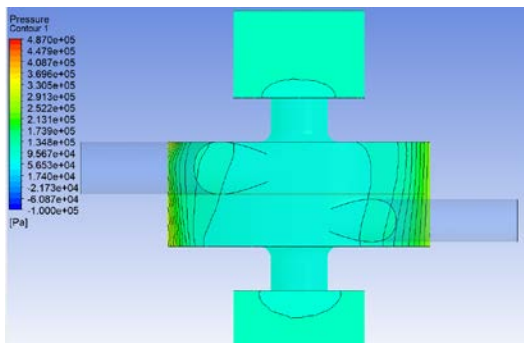
г

Рис. 4. Розподіл осевої (а, б) та повної швидкості (в, г) нафти у вихровій камері насоса вздовж радіуса за різних висот виміру для випадку розрахунку з моделлю кавітації (б, г) та без неї (а, в):

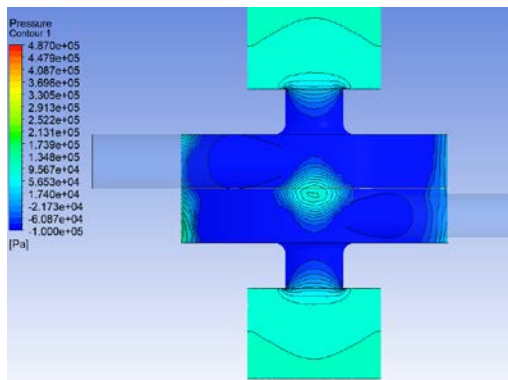
синя лінія – нижня торцева стінка насоса 0 мм; червона лінія – на відстані 12 мм від нижньої торцевої стінки; зелена лінія – 24 мм; пурпурна лінія – 36 мм; темно-синя – 48 мм (середина за висотою вихрової камери); салатна – 60 мм; помаранчева – 72 мм; темно-червона – 84 мм; штрихова – 96 мм (верхня торцева стінка камери)

Іншою причиною зниження ККД може бути той факт, що у формулі (2) для визначення ККД використовується густина, а у випадку великої концентрації газу густина суміші значно відрізняється від густини нафти, що може впливати на точність розрахунку ККД.

$$\eta = \frac{p_e - p_{in} + \frac{\rho}{2}(V_e^2 - V_{in}^2)}{p_s - p_e + \frac{\rho}{2}(V_s^2 - V_e^2)} \cdot \frac{Q_{in}}{Q_s}, \quad (2)$$



а



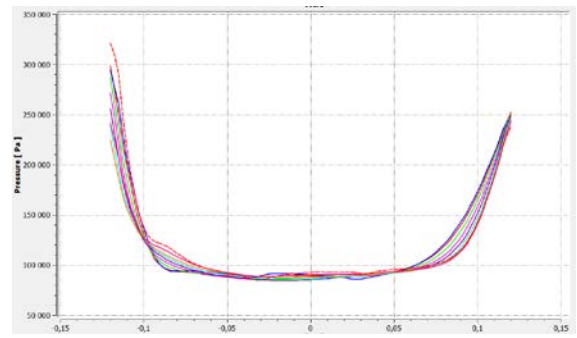
б

Рис. 5. Розподіл тисків у меридіональній площині вихорокамерного насоса:

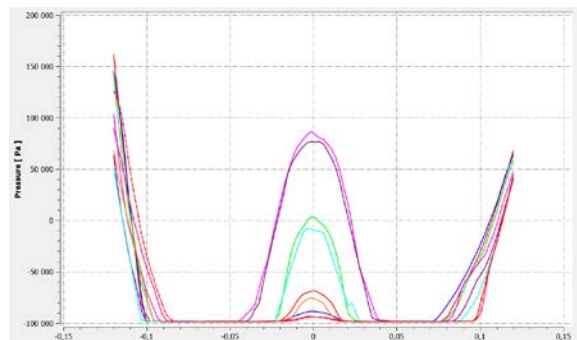
а – модель без урахування кавітації; б – з урахуванням

В подальших дослідженнях слід розраховувати ККД за окремими потоками рідини та газу. Додатковою проблемою може виступати недостатність якості розрахункових сіток, та необхідність використання моделей турбулентності з коригуванням на обертання потоків. В багатьох літературних джерелах є посилання на такі моделі та їх коригування [23, 24]. Коригування на кривизну ліній струму та обертання потоку може привести до збільшення вакууму та більш гарного співпадіння з експериментальними даними розподілів тиску вздовж радіусу вихрової камери. Недостатньо правильно розрахована величина вакууму може приводити до зниження розрахункового ККД насоса більш ніж в два рази.

Загалом можна стверджувати, що ККД вихорокамерного насоса більш ніж в два рази перевищив ККД серійного промислового насоса прямооточного струминного типу НСФБ 39/45.



а



б

Рис. 6. Розподіл тиску у вихровій камері насоса вздовж радіуса за різних висот виміру для випадку розрахунку з моделлю кавітації (б) та без (а):

синя лінія – нижня торцева стінка насоса 0 мм; червона лінія – на відстані 12 мм від нижньої торцевої стінки; зелена лінія – 24 мм; пурпурна лінія – 36 мм; темно-синя – 48 мм (середина за висотою вихрової камери); салатна – 60 мм; помаранчева – 72 мм; темно-червона – 84 мм; штрихова – 96 мм (верхня торцева стінка камери)

Висновки. В роботі числовим шляхом досліджено та визначено кінематичні параметри течії у вихорокамерних насосах під час перекачування нафти.

Вперше на основі числових досліджень підтверджено можливість використання вихорокамерних насосів для перекачування нафти. При цьому ККД складає приблизно 15 %, що майже вдвічі перевищує ККД прямооточних струминних насосів НСФБ 39/43, що використовуються для цієї мети.

Розрахунок інтегральних параметрів підтвердив, що проблемою отримання картин течії є неспівпадіння результатів розрахунку за різними моделями. Слід зазначити, що значення коефіцієнта корисної дії насоса під час розрахунку за моделлю кавітації виявився значно меншим ніж за розрахунком без урахування моделі кавітації. Це можна пояснити виділенням газу з нафти, що утворює проблеми всмокування нафти у насос.

Вибір моделі, за якою відбувається розрахунок числовими методами значно впливає на інтегральні характеристики роботи вихорокамерного насоса, особливо під час двофазної його роботи. Так, урахування моделі Релея-Плессета (моделі кавітації) привело до зменшення ККД. Причому, фізичні картини течії з урахуванням кавітації візуально

адекватно описують процес, що відбувається в насосі, якщо рідина включає в себе деяку кількість газу.

Список літератури

1. Якимечко Я. Я. Використання пульсаційно-хвильової технології для інтенсифікації видобування високов'язких нафт. *Збірник статей учасників дев'ятого всеукраїнської практично-пізнавальної інтернет-конференції «Наукова думка сучасності і майбутнього» (27 березня–11 квітня 2018 р., Дніпро)*. Дніпро: Вид-во НМ, 2018. С. 19–21.
2. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. *Струйные аппараты*. Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
3. Сьомін Д. О., Роговий А. С. Вплив умов входу середовища, що перекачується, на енергетичні характеристики вихрекамерних насосів. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2015. No. 3 (1112). P. 130–136.
4. Семин Д. А., Роговой А. С. Экспериментальные исследования характеристик струйно-вихревого насоса. *Вісник Сумського державного університету. Сер.: Технічні науки*. Суми: СумДУ. 2005. № 12 (84). С. 64–70.
5. Rogovyi A. Energy performances of the vortex chamber supercharger. *Energy*. 2018. Vol. 163. P. 52–60.
6. Beck J. L. Patent 444862, United States. *Vortex injection method and apparatus*. 1984.
7. Сьомін Д. О., Роговий А. С. *Вихорокамерні нагнітачі: монографія*. Харків: ФОП Мезина В. В., 2017. 204 с.
8. Rogovyi A., Korohodskiy V., Khovanskiy S., Hrechka I., Medvediev Y. Optimal design of vortex chamber pump. *XVI International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery – HERVICON+PUMPS-2020. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1741 (8–11 September 2020, Sumy)*. Sumy: IOP Publishing, 2020. P. 012018. doi:10.1088/1742-6596/1741/1/012018
9. Rogovyi A., Korohodskiy V., Neskorozenyi A., Hrechka I., Khovanskiy S. Reduction of Granular Material Losses in a Vortex Chamber Supercharger Drainage Channel. *In Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*. 2022. P. 218–226.
10. Rogovyi A., Korohodskiy V., Medvediev Y. Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump. *Energy*. 2021. Vol. 218. P. 119432. doi: 10.1016/j.energy.2020.119432
11. Паневник О. В., Дубей О. Я. Экспериментальное дослідження водогазового ежектора в процесі інжектування вуглекислого газу. *Нафтогазова енергетика*. 2015. № 2. С. 23–31.
12. Роговий А. С. *Розробка теорії та методів розрахунку вихорокамерних нагнітачів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.17*. Харків, 2017. 364 с.
13. Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. *Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебн. пособие*. Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
14. Alahmadi Y. H., Nowakowski A. F. Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 147. P. 150–165. doi: 10.1016/j.ces.2016.03.023
15. Valera-Medina A., Viguera-Zuniga M. O., Baej H., Syred N., Chong C. T., Bowen P. J. Outlet geometrical impacts on blowoff effects when using various syngas mixtures in swirling flows. *Applied energy*. 2017. Vol. 207. P. 195–207. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.119
16. Yin J., Qian Y., Zhang T., Wang D. Measurement on the flow structure of a gas-liquid separator applied in TMSR. *Annals of Nuclear Energy*. 2019. Vol. 126. P. 20–32. doi: 10.1016/j.anucene.2018.11.009
17. Babenko V. V., Blohin V. A., Voskoboinick A. V., Turick V. N. Velocity Fluctuations in a Swirling Jet of a Vortex Chamber. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 2005. Vol. 32, no. 2. P. 184–198.
18. Семин Д. А., Роговой А. С., Левашов А. Н., Левашов Я. Н. Верификация расчетов течений в вихрекамерных устройствах. *Вісник Нац. техн. ун-ту України «КПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Машинобудування*. Київ: НТУУ «КПІ». 2016. № 2 (77). С. 71–78. doi: 10.20535/2305-9001.2016.77.74796
19. Markovich D. M., Abdurakipov S. S., Chikishev L. M., Dulin V. M.,

- Hanjalić K. Comparative analysis of low-and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions. *Physics of Fluids*. 2014. Vol. 26 (6). P. 065109. doi: 10.1063/1.4884915
20. Cozzi F., Rohit S., Solero G. Analysis of coherent structures in the near-field region of an isothermal free swirling jet after vortex breakdown. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019. Vol. 109. P. 109860. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.109860
 21. Besagni G., Inzoli F. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 117. P. 122–144.
 22. Smirnov P. E., Menter F. R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term. *Journal of Turbomachinery*. 2009. Vol. 131, issue 4. P. 1–8. doi: 10.1115/1.3070573
 23. Stephens D. W., Mohanarangam K. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*. 2010. Vol. 10, issue 5–6. P. 366–373.
 24. Shur M. L., Strelets M. K., Travin A. K., Spalart P. R. Turbulence modeling in rotating and curved channels: assessing the Spalart-Shur correction. *AIAA journal*. 2000. Vol. 38, no. 5. P. 784–792. doi: 10.2514/2.1058

References (transliterated)

1. Yakymchko Ya. Ya. Vykorystannya pul'satsiyno-khvyly'ovoyi tekhnolohiyi dlya intensyfikatsiyi vydobuvannya vysokov'yazkykh naft [The use of pulsation-wave technology to intensify the production of highly viscous oils]. *Zbirnyk statey uchasykiv dev'yatnadtsyatoyi vseukrayins'koyi praktychno-piznaval'noyi internet-konferentsiyi "Naukova dumka suchasnosti i maybutn'oho" (27 bereznya–11 kvitnya 2018 r., Dnipro)* [A collection of articles by the participants of the nineteenth All-Ukrainian practical and cognitive Internet conference "Scientific thought of the present and the future" (March 27–April 11, 2018, Dnipro)]. Dnipro, NM Publ., 2018, pp. 19–21.
2. Sokolov E. Ya., Zinger N. M. *Struynye apparaty* [Jet devices]. Energoatomizdat Publ., 1989. 352 p.
3. S'omin D. O., Rohovyy A. S. Vplyv umov vkhodu seredovyshcha, shcho perekachuyet'sya, na enerhetychni kharakterystyky vykhrekaemnykh 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.
4. Semin D. A., Rogovoy A. S. Eksperimental'nye issledovaniya kharakteristik struyno-vikhrevogo nasosa [Experimental investigations of the characteristics of vortex-fluid pumps]. *Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Sumy State University Bulletin: Technical Sciences Series]. Sumy, SumDU Publ., 2005, no. 12 (84), pp. 64–70.
5. Rogovyi A. Energy performances of the vortex chamber supercharger. *Energy*. 2018, vol. 163, pp. 52–60.
6. Beck J. L. *Vortex injection method and apparatus*. Patent U. S., no. 444862, 1984.
7. S'omin D. O., Rohovyy A. S. *Vykhoroakameri nahnitachi: monohrafiya* [Vortex chamber superchargers]. Kharkiv, FOP Mезина V. V. Publ., 2017. 204 p.
8. Rogovyi A., Korohodskiy V., Khovanskiy S., Hrechka I., Medvediev Y. Optimal design of vortex chamber pump. *XVI International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery – HERVICON+PUMPS-2020. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1741 (8–11 September 2020, Sumy)*. Sumy, IOP Publ., 2020, p. 012018. doi:10.1088/1742-6596/1741/1/012018
9. Rogovyi A., Korohodskiy V., Neskorozenyi A., Hrechka I., Khovanskiy S. Reduction of Granular Material Losses in a Vortex Chamber Supercharger Drainage Channel. *In Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*. 2022, pp. 218–226.
10. Rogovyi A., Korohodskiy V., Medvediev Y. Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump. *Energy*. 2021, vol. 218, p. 119432. doi: 10.1016/j.energy.2020.119432
11. Panevnyk O. V., Dubey O. Ya. Eksperymental'ne doslidzhennya vodohazovoho ezhektora v protsesi inzhektuvannya vuhlekysloho

- hazu [Experimental study of a water-gas ejector in the process of carbon dioxide injection]. *Naftohazova enerhetyka*. 2015, no. 2, pp. 23–31.
12. Rohovyy A. S. *Rozrobka teoriiy 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.
 13. Garbaruk A. V., Strelets M. Kh., Shur M. L. *Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy* [Modeling turbulence in complex flow calculations]. Politekhn. un-t Publ., 2012. 88 p.
 14. Alahmadi Y. H., Nowakowski A. F. Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2016, vol. 147, pp. 150–165. doi: 10.1016/j.ces.2016.03.023
 15. Valera-Medina A., Viguera-Zuniga M. O., Baej H., Syred N., Chong C. T., Bowen P. J. Outlet geometrical impacts on blowoff effects when using various syngas mixtures in swirling flows. *Applied energy*. 2017, vol. 207, pp. 195–207. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.119
 16. Yin J., Qian Y., Zhang T., Wang D. Measurement on the flow structure of a gas-liquid separator applied in TMSR. *Annals of Nuclear Energy*. 2019, vol. 126, pp. 20–32. doi: 10.1016/j.anucene.2018.11.009
 17. Babenko V. V., Blohin V. A., Voskoboinick A. V., Turick V. N. Velocity Fluctuations in a Swirling Jet of a Vortex Chamber. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 2005, vol. 32, no. 2, pp. 184–198.
 18. Semin D. A., Rogovoy A. S., Levashov A. N., Levashov Ya. N. Verifikatsiya raschetov techeniy v vikhrekamernykh ustroystvakh [Verification of flow calculations in vortex chamber devices]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu Ukrayiny "KPI": zb. nauk. pr. Seriya: Mashynobuduvannya* [Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "KPI": a collection of scientific papers]. Kyiv, NTUU "KPI" Publ., 2016, no. 2 (77), pp. 71–78. doi: 10.20535/2305-9001.2016.77.74796
 19. Markovich D. M., Abdurakipov S. S., Chikishev L. M., Dulin V. M., Hanjalić K. Comparative analysis of low-and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions. *Physics of Fluids*. 2014, vol. 26 (6), p. 065109. doi: 10.1063/1.4884915
 20. Cozzi F., Rohit S., Solero G. Analysis of coherent structures in the near-field region of an isothermal free swirling jet after vortex breakdown. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019, vol. 109, p. 109860. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.109860
 21. Besagni G., Inzoli F. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 117, pp. 122–144.
 22. Smirnov P. E., Menter F. R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart–Shur correction term. *Journal of Turbomachinery*. 2009, vol. 131, issue 4, pp. 1–8. doi: 10.1115/1.3070573
 23. Stephens D. W., Mohanaragam K. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*. 2010, vol. 10, issue 5–6, pp. 366–373.
 24. Shur M. L., Strelets M. K., Travin A. K., Spalart P. R. Turbulence modeling in rotating and curved channels: assessing the Spalart–Shur correction. *AIAA journal*. 2000, vol. 38, no. 5, pp. 784–792. doi: 10.2514/2.1058

Hadziuta (received) 18.07.2022

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

Лук'янець Сергій Ігорович (Lukianets Serhiy) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5719-2598>; e-mail: serhii.lukianets@mit.khpi.edu.ua