

Досліджено структуру течії в підвідному пристрої осевого хімічного насоса. Встановлено основні причини та зони гідравлічних втрат. Враховуючи результати дослідження, запропоновано модернізовану конструкцію підвідного пристрою та виконане чисельне моделювання течії в ньому, яке показало зниження гідравлічних втрат майже вдвічі в порівнянні з базовою конструкцією

Ключові слова: підвідний пристрій, гідравлічні втрати, осевий хімічний насос, чисельне моделювання

Исследована структура течения в подводящем устройстве химического осевого насоса. Установлены основные причины и зоны гидравлических потерь. Учитывая результаты исследования, предложена модернизированная конструкция подводящего устройства и выполнено численное моделирование течения в нем, которое показало снижение гидравлических потерь почти вдвое в сравнении с базовой конструкцией

Ключевые слова: подводящее устройство, гидравлические потери, осевой химический насос, численное моделирование

УДК 621.65

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.39454

МОДЕРНІЗАЦІЯ ПІДВІДНОГО ПРИСТРОЮ ОСЬОВОГО ХІМІЧНОГО НАСОСА

М. Л. Заїкіна*

E-mail: marinka.zaikina@mail.ru

О. А. Матвієнко

Кандидат технічних наук, асистент*

E-mail: olhamatvienko@gmail.com

*Кафедра прикладної гідроаеромеханіки
Сумський державний університет
вул. Римського-Корсакова, 2,
м. Суми, Україна, 40007

1. Вступ

Ортофосфорна кислота, яка в наш час отримала широке розповсюдження, використовується в якості флюсу при пайці чорних металів, окисленої міді та нержавіючої сталі. Молекулярні дослідження, що проводяться різними лабораторіями також виконуються за участю даної кислоти. Комбіновані та фосфатні добрива, що отримують за допомогою ортофосфорної кислоти, популярні серед фермерських господарств завдяки тому, що надають рослинам та культурам стійкість до несприятливих умов клімату, сприяють швидкому досягненню врожаю.

Просіякнуті кислотою дерев'яні конструкції проти стоять вогню. Завдяки негорючості багато виробників будівельних матеріалів також використовують ортофосфорну кислоту.

Окрім того, широке використання ортофосфорна кислота знайшла у виробництві харчових продуктів як добавка E338.

Зважаючи на широке використання актуальним завданням є створення вискоєфективного обладнання для виробництва даної речовини.

2. Аналіз літератури та постановка задачі

Ортофосфорна кислота у промислових масштабах отримується екстракційним способом [1]. При цьому для зменшення технологічного часу протікання хімічної реакції необхідна інтенсифікація процесу перемішування робочого середовища за рахунок його примусового прокачування між відсіками реактора.

Традиційно, для такого технологічного процесу використовують насоси з осевими проточними ча-

стинами, що містять послідовно розташовані робоче колесо та випрямний апарат (тип РВ). Проте лопатеві системи такого типу у процесі експлуатації показують низьку ефективність та високу кількість поломок у процесі роботи [2], що зумовлено особливостями перекачуваного середовища.

Таким чином, необхідне створення такого насосного обладнання, яке б містило мінімальну кількість дифузорних ділянок проточної частини, оскільки їх наявність призводить до сповільнення потоку, і, відповідно, до кристалізації продукту. Кристали продукту поступово відкладаються товстим шаром в каналах проточної частини насоса, що призводить до зниження параметрів, а подекуди і до повного їх зриву.

На кафедрі ПГМ Сумського державного університету було запропоновано створення проточної частини осевого хімічного насоса, що містить послідовно розташований напрямний апарат та робоче колесо (тип НР) [3]. Основною перевагою такої конструктивної схеми є підвищена прохідна спроможність, а також мінімальна кількість лопатей для зниження заростання проточної частини при кристалізації продукту. Крім того, конструктивна схема такого типу не поступається за рівнем ККД традиційній [4].

Проте, основною проблемою на шляху широкого використання конструктивних схем такого типу є недостатність відомостей щодо методики проектування проточних частин такого типу, а також особливостей робочого процесу, що відбувається в них. Якщо в роботах [5–7] докладно представлено основні принципи проектування робочих коліс з від'ємним моментом швидкості на вході, то інформації щодо напрямного апарату, на даний момент, маємо досить мало.

3. Мета та задачі дослідження

Виконаний аналіз дозволяє наступним чином сформулювати мету даної роботи – підвищення енергетичної ефективності підвідного пристрою осьового хімічного насоса.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд задач:

- обґрунтування доцільності використання лопаєтєвої системи типу НР в хімічних насосах для отримання ортофосфорної кислоти;

- виконати чисельне моделювання течії в підвідному пристрої хімічного насоса з метою вивчення структури потоку;

- на основі результатів чисельного моделювання модернізувати підвідний пристрій осьового хімічного насоса.

4. Матеріали та методи дослідження

4.1. Методика проведення чисельного дослідження течії в підвідному пристрої осьового хімічного насоса

Для досягнення поставленої мети використовувалася програмний комплекс ANSYS CFX університетської версії. В основу даного програмного продукту закладено метод чисельного вирішення фундаментальних законів гідромеханіки [8].

Моделлю потоку рідини прийнято представлення чисельного розв'язання турбулентних течій рівняннями Рейнольдса (1).

$$\rho \frac{\bar{U}_j \bar{U}_i}{\partial x_i} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\bar{\rho} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \bar{\rho} \bar{U}_i \bar{U}_j \right). \quad (1)$$

Де змінні, що осереднені по часу, відмічені рискою зверху, а пульсаційні складові – апострофом. Ліва частина рівняння (нестационарний член) описує зміну кількості руху рідкого об'єму внаслідок зміни в часі осередненої складової швидкості. Ця зміна компенсується осередненими зовнішніми силами $\rho \bar{f}_i$, осередненими силами тиску – $\bar{\rho} \delta_{ij}$, в'язкісними силами $\mu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right)$. Крім того, в праву частину рівняння

входять турбулентні напруження (напруження Рейнольдса), $\bar{\rho} \bar{U}_i \bar{U}_j$ що враховують додаткові втрати та перерозподіли енергії в турбулентному потоці.

Для замикання рівнянь Рейнольдса використана модель турбулентності k-ε, що враховує особливості течії біля твердих стінок і у зовнішньому потоці та забезпечує задовільні результати для розрахунків потоків, що обмежуються стінками:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \epsilon, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - \rho C_{\epsilon 2} \epsilon), \quad (3)$$

де $P_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ – член, що виражає генерацію енергії k:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\epsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}.$$

Параметри ε та μ_t визначаються наступним чином:

$$\epsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}.$$

Неодноразова апробація програмного продукту підтвердила його придатність до вирішення задач насособудування.

Для чисельного дослідження було побудовано неструктуровану розрахункову сітку для прямого апарата, що нараховувала 1,5 млн. комірок. Для належного опису пограничних шарів поблизу твердих стінок було побудовано 5 шарів призматичних комірок.

Після генерації сіток в препроцесорі задавалися відповідні дані. В якості граничної умови на вході в розрахункову область задавалася масова витрата, на виході – статичний тиск. Для всіх стінок розрахункової області було задано умову рівності нулю швидкості. Шорсткість стінок була прийнята Ra 6,3 (за ГОСТ 2789-73). Робоче середовище (вода за нормальних умов) приймалося нестисливим, режим течії турбулентний.

Величина змінної Y⁺ знаходилася в межах від 10 до 100 одиниць, що відповідає рекомендаціям, приведеним в посібнику користувача [9, 10].

Моделювання проводилось для води у діапазоні подач від 0,7 Q_{розр} до 1,2 Q_{розр}.

4.2. Методика визначення параметрів підвідного пристрою

З метою визначення мінімальної кількості елементів сітки, що забезпечують прийнятну точність отриманих результатів, було виконане дослідження сіткової незалежності.

Для цього було побудовано 5 неструктурованих сіток розрахункової області, які відрізнялися величиною максимального глобального елемента та щільністю комірок біля твердих стінок (табл. 1).

Таблиця 1

Основні характеристики побудованих неструктурованих сіток

| № | Максимальний глобальний елемент | Загальна кількість комірок |
|-----------|---------------------------------|----------------------------|
| Сітка № 1 | 12 | 1 156 497 |
| Сітка № 2 | 11 | 1 559 608 |
| Сітка № 3 | 10 | 1 833 722 |
| Сітка № 4 | 8 | 2 639 577 |
| Сітка № 5 | 7 | 2 944 039 |

За отриманими даними було побудовано графік залежності втрат напору від загальної кількості комірок, що містить сітка (рис. 1). Головною метою було знайти межу тій кількості комірок, перетинаючи яку

результати розрахунків не залежатимуть від структури сітки.

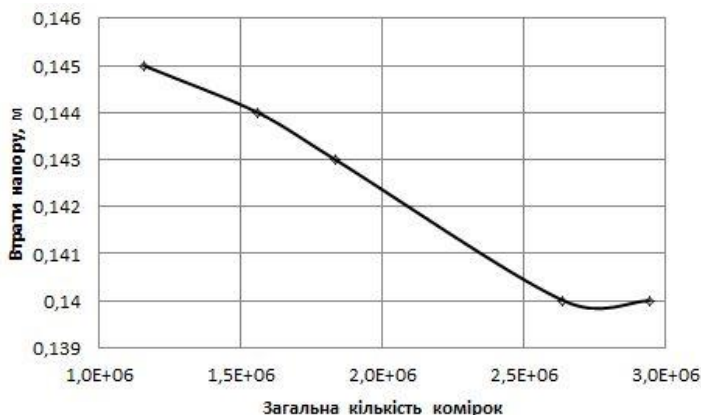


Рис. 1. Сіткова незалежність

З рис. 1 видно, що при загальній кількості 2 639 577 елементів сітки значення втрат напору не змінюються. Тобто, загушувати сітку більше вказаного числа не має необхідності, оскільки це вже не впливатиме на розрахунок. Тому для подальших розрахунків було прийнято сітку № 5.

5. Результати чисельного моделювання базового та модернізованого підвідного пристрою

Особливістю конструктивної схеми типу НР є необхідність формування особливої структури потоку перед робочим колесом. Дана функція виконується дифузорним підвідним пристроєм.

При цьому на вході в робоче колесо наявний момент швидкості:

$$k_1 = R_1 V_{u1}$$

де R_1 – радіус входу в робоче колесо; V_{u1} – колова складова абсолютної швидкості на вході в робоче колесо.

Тому для дослідження було використано підвідний пристрій (рис. 2), який спроектований за рекомендаціями [1] на параметри: подача 2000 м³/год, напір 3,5 м, глибина всмоктування 2,2 м.

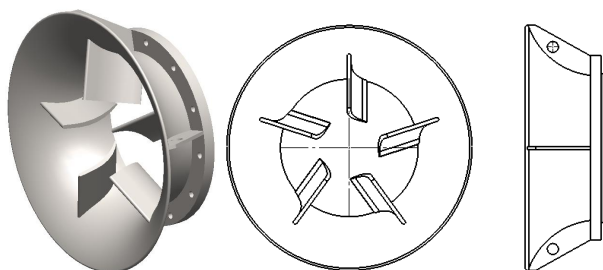
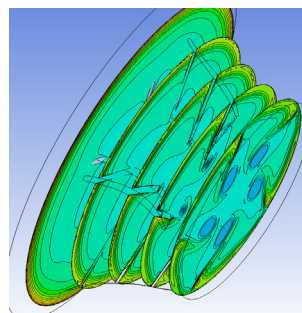


Рис. 2. Зовнішній вигляд напрямного апарату

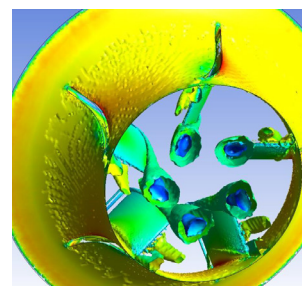
В результаті розрахунків отримана структура просторового потоку в підвідному пристрої осевого хімічного насоса. Розрахувавши число Рейнольдса на середньому перетині підвідного пристрою отримали значення $Re=6,17 \cdot 10^5$. Це означає, що течія у пристрої –

турбулентна, крім того аналізуючи це значення за графіком Нікурадзе можна зробити висновок, що турбулентний режим є квадратичним, тобто коефіцієнт гідравлічного тертя не залежить від числа Рейнольдса.

На рис. 3, а представлено розподіл повного тиску в напрямному апараті для оптимального режиму роботи насоса. Потік має складну просторову структуру. Як видно з рис. 3, б на виході з напрямного апарату існує п'ять зон вихроутворення, що відповідає кількості лопатей. Дані зони виникають внаслідок наявності вторинних токів і зумовлюють основну частину втрат в напрямному апараті.



а



б

Рис. 3. Візуалізація течії в напрямному апараті: а – розподіл повного тиску в напрямному апараті; б – ядра вихорів

Внаслідок надмірного повороту потоку на перегині лопатки граничний шар в торцевій зоні починає згортатися у вихор (рис. 3, б), який поступово розширюється до виходу з напрямного апарату.

На рис. 4 представлено графік залежності втрат напору в напрямному апараті від значення коефіцієнту подачі. Дані втрати становлять 2...5,5 % від значень розрахункового напору (в залежності від режиму роботи). Таким чином, маємо резерв для підвищення енергетичної ефективності підвідного пристрою, і, відповідно, самого насосного агрегату.

Головною умовою модернізації є збереження параметрів потоку на вході в робоче колесо (абсолютної швидкості, кута потоку, циркуляції) з одночасним зниженням гідравлічних втрат.

На рис. 5 представлено розподіл відносної швидкості ($V' = \frac{V_i}{V_{сеп}}$, де V_i – абсолютна швидкість на поточному радіусі, $V_{сеп}$ – осереднена по масовій витраті швидкість у вихідному перетині) на виході з напрямного апарату. Відносним радіусом вважається відношення

поточного радіусу до зовнішнього радіусу напрямного апарату на виході.

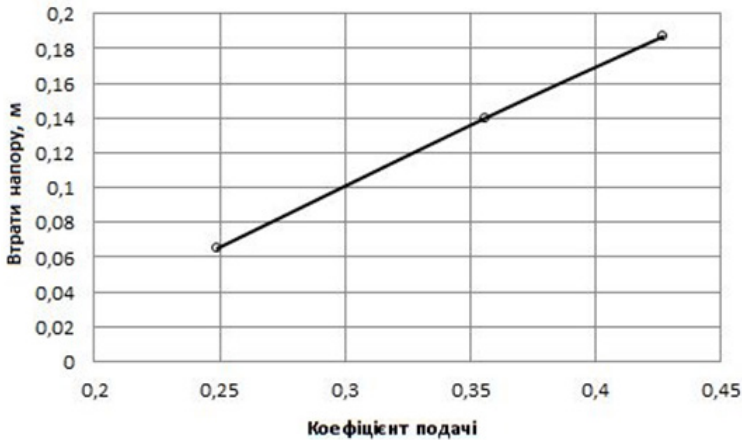


Рис. 4. Втрати напору в базовому підвідному пристрої осьового хімічного насоса

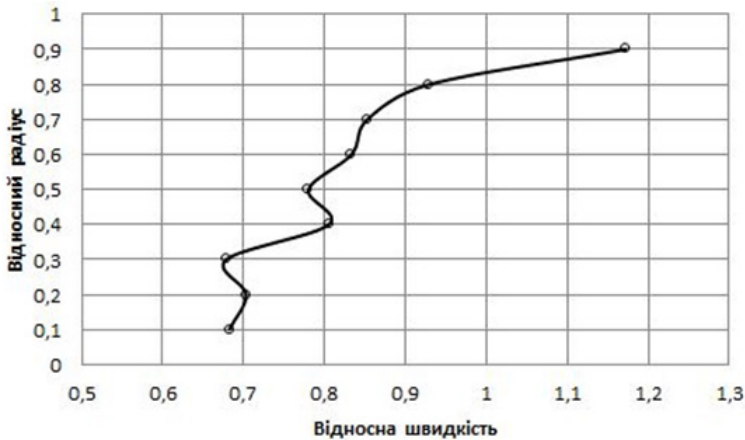


Рис. 5. Розподіл відносної швидкості на виході з напрямного апарату

Як видно з рис. 5, у зоні ядра потоку (в районі вісі напрямного апарату) спостерігається зниження значень швидкості, при цьому на периферії величини швидкості зростають.

Оскільки на втрати значною мірою впливають вихори, котрі утворюються на лопатках, було прийнято рішення щодо їх розсіювання. Для цієї мети було спроектовано напрямний апарат, котрий містить в собі не лише лопатки, а й обтікач.

Для дослідження було спроектовано напрямний апарат (рис. 6) для насоса на параметри: подача 2000 м³/год, напір 3,5 м, глибина всмоктування 2,2 м.

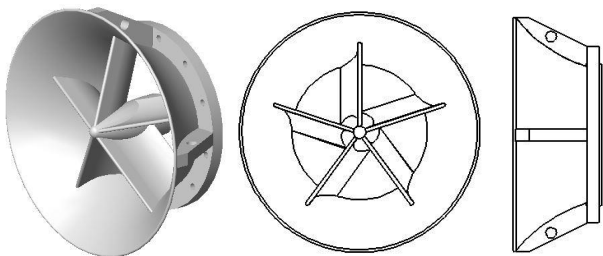


Рис. 6. Зовнішній вигляд підвідного пристрою з обтікачем

В результаті розрахунків отримана структура просторового потоку в напрямному апараті осьового хімічного насоса.

На рис. 7, а представлено розподіл повного тиску в напрямному апараті для оптимального режиму роботи насоса. Як і в попередньому випадку, потік має складну просторову структуру. За обтікачем спостерігається вихровий слід (рис. 7, б), проте, в порівнянні з попереднім випадком, він значно менший.

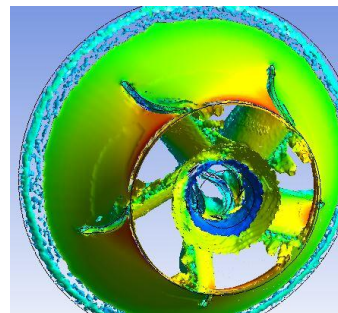
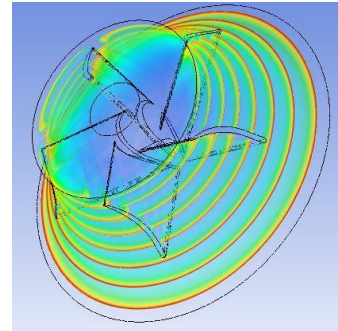


Рис. 7. Візуалізація течії в напрямному апараті з обтікачем: а – розподіл повного тиску в напрямному апараті; б – ядра вихорів

На рис. 8 представлено графік залежності втрат напору в напрямному апараті від значення подачі.

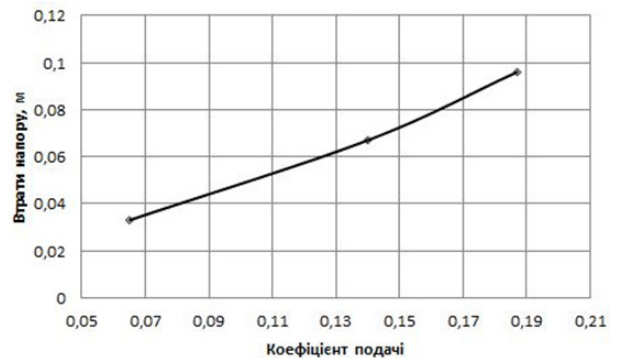


Рис. 8. Втрати напору в модернізованому підвідному пристрої осьового хімічного насоса

Дані втрати становлять 0,9...2,74 % від значень розрахункового напору в залежності від режиму роботи.

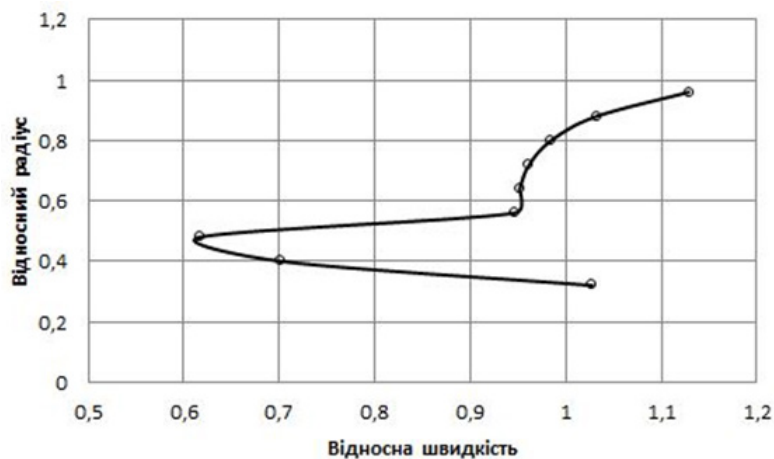


Рис. 9. Розподіл відносної швидкості на виході з напрямного апарату

На рис. 9 представлено розподіл абсолютної швидкості на виході з напрямного апарату. Відносним радіусом вважається відношення поточного радіуса до зовнішнього радіуса напрямного апарату на виході.

Як видно з рис. 9 у зоні ядра потоку (в районі вісі напрямного апарату) спостерігається зниження значень швидкості, при цьому на периферії величини швидкості зростають. Таке різке зменшення швид-

кості зумовлене наявністю пограничного шару поблизу твердої стінки обтікача.

6. Висновки

В результаті проведених досліджень було встановлено наступне:

В технологічному процесі виробництва ортофосфornoї кислоти доцільно використовувати осьові насоси з лопатевою системою типу НР (напрямний апарат – робоче колесо), оскільки вони мають більшу надійність в порівнянні з класичними конструктивними схемами, при збереженні рівня ККД.

Досліджено структуру потоку в підвідному напрямному пристрої осьового хімічного насоса з лопатевою системою типу НР.

Встановлено основні зони гідравлічних втрат. Встановлено, що гідравлічні втрати в підвідному пристрої становлять від 2 до 5,5 % від значень розрахункового напору в залежності від режиму роботи.

Запропоновано конструкцію модернізованого підвідного пристрою. Проведено чисельне дослідження потоку у ньому, встановлено, що гідравлічні втрати в порівнянні з базовою конструкцією знизились на 54,3 %.

Література

1. Злотников, Э. Г. Краткий справочник по химии [Текст] / Э. Г. Злотников. – С.-Петербург, 2012. – 192 с.
2. Гусак, А. Г. Создание вертикального осевого насоса с лопастной системой типа НР для интенсификации технологического процесса получения аммофоса [Текст] / А. Г. Гусак, А. А. Евтушенко, И. В. Островский, А. А. Папченко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2008. – № 3. – С. 47–51.
3. Гусак, А. Г. Расчет и проектирование проточной части осевого химического вертикального насоса ОХВ 2000/3,5 с лопастной системой типа НР [Текст]: матер. наук.-тех. конф. / А. Г. Гусак, А. А. Евтушенко, И. В. Островский, А. А. Папченко // Конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій: конференція присвячена Дню науки в Україні. – Суми : СумДУ. – 2009. – Ч. III. – С. 38.
4. Гусак, А. Г. О резервах повышения КПД лопастной системы типа НР [Текст]: матер. Всеук. міжв. наук.-техн. конф. / А. Г. Гусак, А. А. Евтушенко, В. А. Панченко // Сучасні технології в промисловому виробництві. – Суми: СумДУ. – 2010. – Ч. III. – С. 38–39.
5. Гусак, А. Г. Совершенствование проточных частей погружных моноблочных насосных агрегатов высокой быстроходности [Текст]: дис. ... канд. тех. наук. 05.05.17 / А. Г. Гусак. – Суми, 1996. – 213 с.
6. Кочевський, О. М. Оптимізація геометричних параметрів відвідних пристроїв насосів високої швидкості з лопатевою системою типу НР [Текст]: автореферат / О. М. Кочевський. – Суми: Сумський державний університет, 2001. – 19 с.
7. Федотова, Н. А. Обзор существующих данных о лопастной системе типа НР [Текст]: матер. наук.-тех. конф. / Н. А. Федотова // Конференція присвячена Дню науки України та 60-річчю СумДУ. – Суми: СумДУ. – 2008. – Ч. II. – С. 129.
8. Матвієнко, О. А. Малогабаритний осьовий ступінь свердловинного насоса з підвищеною енергетичною ефективністю [Текст]: дис. ... канд. наук 05.05.17 / О. А. Матвієнко. – Суми, 2013. – 148 с.
9. ANSYS CFX 11.0 Solver Theory. Release 11.0 [Electronic resource] / 2008. – 261 p. – Available at: <http://www.ansys.com>
10. ANSYS CFX 11.0 Solver Models. Release 11.0 [Electronic resource] / 2000. – 549 p. – Available at: <http://www.ansys.com>