

УДК 621.65

О.І. Котенко, В.Ю. Кондусь*Сумський державний університет***ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ РОБОЧОГО КОЛЕСА ВІЛЬНОВИХРОВОГО НАСОСА**

Енергоефективність промислового обладнання є ключовим фактором, що впливає на собівартість одиниці продукції.

У зв'язку зі значним зростанням вартості енергоресурсів постає питання підвищення енергоефективності насосів, які використовуються у промисловості для транспортування рідин, що містять крихкі або волокнисті включення, абразивні частинки; суспензій; рідин із підвищеною в'язкістю або високим умістом повітря.

Мета роботи визначити ефективні напрямки підвищення к.к.д. вільновихрового насоса шляхом вдосконалення його проточної частини.

Дослідження виконано з використанням методики оцінювання вартості життєвого циклу машини, що дозволяє комплексно оцінити інвестиційні витрати на виготовлення й технічне обслуговування, на електроенергію та інші види витрат у процесі роботи вільновихрових насосів.

У результаті проведення літературного огляду встановлено основні шляхи вдосконалення конструкції проточної частини вільновихрових насосів. Оцінювання вартості життєвого циклу насоса СВН дозволило мінімізувати інвестиційні витрати за рахунок зміни конструкції його робочого колеса.

Запропонована конструкція робочого колеса дозволяє підвищити к.к.д. вільновихрового насоса на 4–5% без необхідності заміни інших складових його конструкції.

Ключові слова: робоче колесо, лопать, профілювання, вільновихровий насос, СВН, вартість життєвого циклу, LCC.

А.И. Котенко, В.Ю. Кондусь**ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА СВОБОДНОВИХРОВОГО НАСОСА**

Энергоэффективность промышленного оборудования является ключевым фактором, влияющим на себестоимость единицы продукции.

В связи со значительным ростом стоимости энергоресурсов возникает необходимость повышения энергоэффективности насосов, используемых в промышленности для транспортировки жидкостей, содержащих твердые, хрупкие или волокнистые включения; абразивные частицы; суспензий; жидкостей с повышенной вязкостью или высоким содержанием воздуха.

Цель работы определить эффективные направления повышения к.п.д. свободновихрового насоса путем усовершенствования его проточной части.

Исследование выполнено с использованием методики оценки стоимости жизненного цикла машины, которое позволяет комплексно оценить инвестиционные расходы на изготовление и техническое обслуживание, на электроэнергию и другие виды расходов в процессе работы свободновихровых насосов.

В результате проведения литературного обзора установлены основные пути усовершенствования конструкции проточной части свободновихровых насосов. Оценивание стоимости жизненного цикла насоса СВН позволило минимизировать инвестиционные расходы за счет изменения конструкции его рабочего колеса.

Предложенная конструкция рабочего колеса позволяет повысить к.п.д. свободновихрового насоса на 4 - 5% без необходимости замены других составляющих его конструкции.

Ключевые слова: рабочее колесо, лопасть, профилирование, свободновихровой насос, СВН, стоимость жизненного цикла, LCC.

A. Kotenko, V. Kondus**JUSTIFICATION ADVISABILITY OF IMPROVING THE VORTEX PUMP IMPELLER DESIGN**

Energy efficiency of industrial equipment is a key factor that influences on the cost of product unit.

Due to the significant increasing of energy prices last years arises the question of increasing vortex pump energy efficiency using in industry for transporting liquids containing solid, brittle, fibrous or abrasive particles inclusion, liquids with high viscosity or high containing air.

Objective: identification effective ways of raising efficiency of vortex pump by improving the flowing part.

The investigation was conducted using valuation techniques lifecycle machines that allow to evaluate the investment costs for manufacturing and maintenance, electricity and other costs in the working processes of vortex pumps.

As a result of the literature review there were found the main ways of improving the vortex pump impeller design. Valuation of the life cycle of vortex pump allows minimizing investment costs due to changes in the design of its impeller.

The design of impeller allows increasing efficiency of vortex pump up to 4 - 5% without the necessity of replacing other components of the vortex pump design.

Keywords: impeller, blade, profiling, vortex pump, life cycle cost, LCC.

Постановка проблеми

Для транспортування чистих рідин у промисловості та різних галузях господарства використовують відцентрові насоси. На практиці часто доводиться транспортувати рідини, що містять тверді домішки, суміші з піском, рідини з волокнистими включеннями, кристалічними або абразивними домішками, в'язкі рідини тощо. Для наведених умов роботи застосовують насоси з одно- або двоканальними відцентровими робочими колесами. Але при перекачуванні рідин, що містять включення, корисна потужність відцентрових насосів знижується вже за наявності 7% домішок у рідині [1].

Під час транспортування рідин, що містять абразивні домішки, відбувається швидке зношування елементів проточної частини відцентрових насосів. Перекачування газовмісних емульсій призводить до зменшення основних параметрів насоса.

У таких випадках доцільно використовувати вільновихрові насоси СВН. Вільновихрові насоси мають нижчий щодо відцентрових насосів к.к.д., але значно більший ресурс роботи.

Мета роботи визначити ефективні напрямки підвищення к.к.д. СВН шляхом удосконалення його проточної частини.

Аналіз літературних даних

Дослідження вільновихрових насосів датуються 50-ми роками ХХ століття. Перший насос типу «Wemco» було виготовлено у 1954 році в США підприємством «Western Machinery Co» [2]. У насосах цього типу к.к.д. не перевищував 40%.

У результаті проведення більше ніж 180 випробувань ученим Е. Еггером було запропоноване нове конструктивне рішення – вільновихровий насос типу «Туго», що відрізняється від насосів типу «Wemco» розміщенням робочого колеса виключно в розточці корпусу (рис. 1) [3].

Робочий процес СВН типу «Туго» є предметом дослідження низки наукових праць [3 – 9].

Конструкція вільновихрового насоса типу «Туго» дозволяє транспортувати рідини за умови часткової взаємодії потоку з його робочим органом. Через міжлопатеві канали робочого колеса проходить 15–20% потоку рідини. Механічна енергія обертання вала перетворюється на гідравлічну енергію внаслідок взаємодії основного потоку з тороподібним вихором, що створюється у вільній камері насоса внаслідок обертання робочого колеса.

Професор Євтушенко А. А. зробив припущення, що у вихрових машинах наявний як вихровий, так і лопатевий робочий процес [10]. При цьому їх співвідношення залежить від виду вихрової машини, а також від співвідношення геометричних розмірів основних елементів проточної частини вільновихрового насоса.

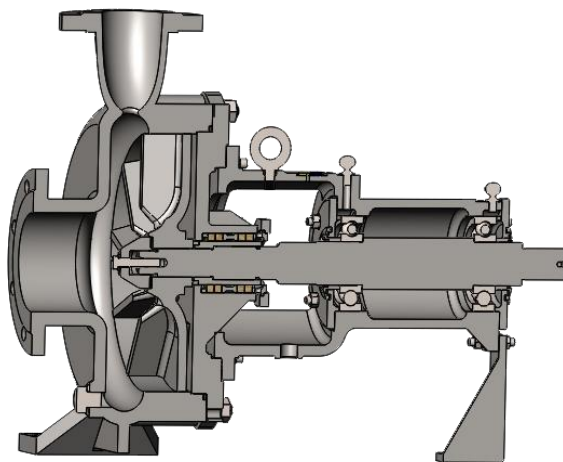


Рис. 1. – Вільновихровий насос типу «Туго»

У дослідженнях [11, 12] теоретично визначено максимально можливе значення к.к.д. вихрового процесу, що становить $\eta_{\text{сmax}} = 0,58$. Було встановлено, що для вільновихрового насоса типу «Туго» к.к.д. не перевищує $\eta_{\text{рпmax}} = 0,61 - 0,63$. Одержані результати підтвержені експериментальним шляхом.

Для підвищення напору, що створюється насосом, у роботі [13] описана двоступінчаста конструктивна схема насоса СВН, в якій симетрична конструкція робочого колеса дозволяє

мінімізувати дію осьової сили. Багатоступінчастий вільновихровий насос, в якому ступені розміщені послідовно, розглянутий у праці [14]. Збільшення подачі вільновихрового насоса шляхом використання робочого колеса двостороннього входу розглянуто в працях [15, 16].

На основі дослідження впливу бокового зазору між робочим колесом та корпусом у відцентрових насосах із напіввідкритим робочим колесом на основні параметри насоса [17], у роботах [18 – 20] запропонований насос СВН типу «Seka». На відміну від насосів типу «Tуго» робочий процес у насосах типу «Seka» забезпечується не лише за допомогою передачі енергії від тороподібного вихору основному потоку, а й із безпосередньою передачею енергії потоку від лопаті, що є характерним для робочого процесу відцентрових насосів. Однак використання насосів типу «Seka» для транспортування рідин, що містять домішки, може призводити до закупорювання насоса, а також руйнування легкоушкоджуваних включень.

Під час експлуатації насосних установок в умовах транспортування чистих рідин к.к.д. відцентрових насосів вищий, ніж у вільновихрових насосів. Однак за наявності включень у робочих рідинах к.к.д. насосних установок із використанням відцентрових насосів у процесі експлуатації знижується. Для забезпечення високого значення к.к.д. насосних установок у роботі [21] запропоновано схему заміни конструкції проточної частини відцентрових насосів на вільновихрові насоси. Подібну модернізацію виконують шляхом заміни роторних елементів проточної частини, причому корпус насоса залишається незмінним.

Методи дослідження

Для досягнення максимального рівня к.к.д. СВН при забезпеченні мінімальних інвестиційних витрат запропоновано метод оцінювання вартості життєвого циклу (Life Cycle Cost, LCC) насосної установки (рис. 2) [22].

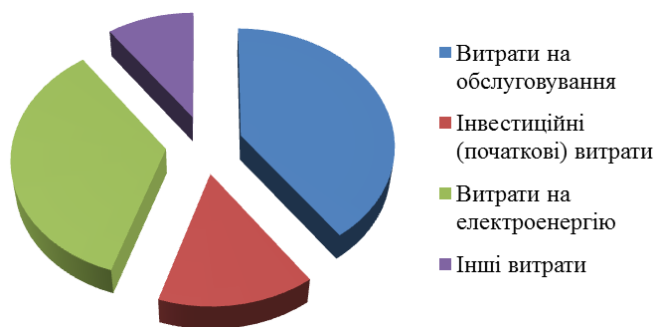


Рис. 2. – Структура вартості життєвого циклу насосної установки

Аналіз її вартості дозволяє не лише розраховувати абсолютні витрати за кожною складовою, а й визначити їх частку в структурі загальної вартості LCC.

У процесі експлуатації насоса до найбільших витрат відносять витрати на обслуговування та електроенергію. Значну частку в загальній структурі вартості життєвого циклу насосної установки займають також інвестиційні витрати.

Витрати на електроенергію насосної установки оцінюють відповідно до правильності підбору насоса за робочими параметрами, а також за його к.к.д.

Порівняння загальних витрат під час роботи різних видів насосів у складі насосних установок, що використовуються для транспортування рідини з включеннями (рис. 3), наведено у праці [23].

Експлуатація насосів в умовах транспортування рідин, які містять включення, показала, що загальні витрати в насосних установках із використанням вільновихрових насосів значно нижчі, ніж при застосуванні інших типів насосів. Це досягається внаслідок значно нижчих витрат на обслуговування, що обумовлюються більшим ресурсом роботи вільновихрових насосів [24].

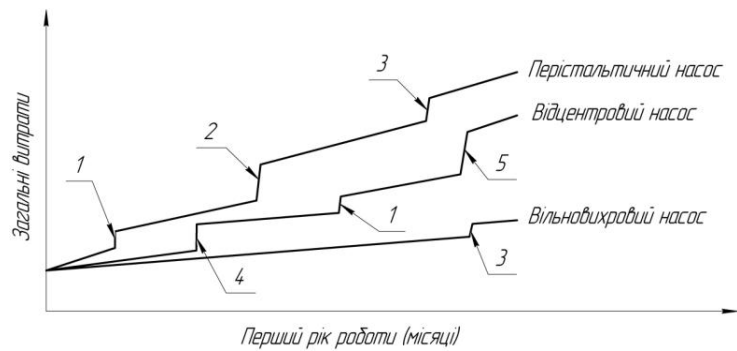


Рис. 3. – Графік залежності загальних витрат за перший рік експлуатації насосів різних типів:

1 – засмічення, що вимагає зупинення та ремонту насоса; 2 – заміна статорних і роторних елементів; 3 – заміна ущільнення вала унаслідок зношення; 4 – заміна переднього ущільнення; 5 – заміна робочого колеса

Результати дослідження

Модернізація вільновихрових насосів, що проходить без заміни корпусних елементів, не змінює інвестиційних витрат. При цьому заміна робочого колеса на запропоноване дозволяє підвищити енергоефективність насосів СВН. Підвищення к.к.д. вільновихрових насосів досягається частковою заміною елементів проточної частини, що забезпечить мінімальний період окупності проведених заходів.

Виходячи із заданих умов, найбільш доцільною є зміна конструкції робочого колеса насоса. У зв'язку з його розміщенням у розточці корпусу (див. рис. 1) необхідно забезпечити незмінний розмір зовнішнього діаметра D_2 .

Вплив конструкції робочого колеса типу «Туго» на характеристики вільновихрового насоса розглянуто в праці Е. Егера [3]. Автором досліджено 14 робочих коліс, що відрізнялися конструкцією профілю лопаті, кутом її установлення в плані β та числом лопатей z . У роботі визначено, що найбільший к.к.д. у вільновихрових насосах досягається при значенні обмежувального кута $\alpha = 0^\circ$ (рис. 4).

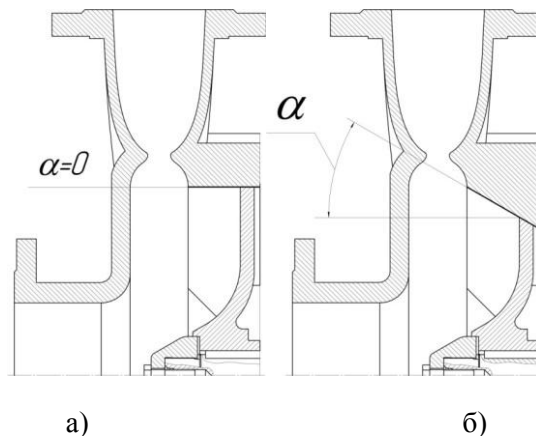


Рис. 4. – Конструкція вільновихрового насоса з використанням робочого колеса, обмежувальний кут α якого: а) $\alpha = 0^\circ$; б) при значенні кута $\alpha > 0^\circ$

На основі конструкції вільновихрових насосів типу «Туго» сформована окрема серія насосів, що одержала назву «Т-Туго» [25]. У насосах серії «Т-Туго» передбачається спільне використання корпусу вільновихрового насоса, що містить вільну камеру, а також ротора з відцентровим або осьовим робочим колесом.

Підвищення робочих параметрів насосів СВН шляхом виконання фланців на кромці із робочого або тильного боку лопатей робочого колеса розглянуто в працях [26 – 28]. Однак для ефективної роботи насосів з використанням таких робочих коліс необхідне існування зазору між робочим колесом та розточкою корпусу [29], що істотно знизить напір насоса.

Підвищення робочих параметрів вільновихрових насосів шляхом використання робочих коліс з подовженими лопатями розглянуто в дослідженнях [30 – 34]. Запропонована конструкція робочого колеса дозволяє підвищити кутову швидкість обертання рідини у вільній камері ω_p , незважаючи на ускладнення процесу утворення подовжнього вихору. При цьому за рахунок виходу лопатей робочого колеса у вільну камеру в насосі наявний як вихровий, так і лопатевий робочий процес, як було зазначено в дослідженні [10].

Двоярусна конструкція робочого колеса для підвищення напору насосів СВН, запропонована в роботі [35].

У працях [36, 37] із метою підвищення напору та к.к.д. вільновихрових насосів запропоновано використовувати гвинтове робоче колесо. Широкі міжлопатеві канали гвинтового робочого колеса дозволяють перекачувати рідини, що містять значні за розмірами включення без ризику закупорювання проточної частини насоса. Однак використання насосів із гвинтовими робочими колесами призводить до руйнування значної частини продукту, що містить легкоушкоджувані включення.

Вплив конструктивних елементів робочих коліс із радіальними лопатями на характеристики вільновихрових насосів досліджено у працях [38 – 43].

Дослідження впливу кута установлення лопаті робочого колеса в плані β із використанням прямих лопатей на робочі параметри вільновихрових насосів проведено у працях [44, 45]. Визначено, що при зменшенні цього кута відбувається підвищення к.к.д. та зниження напору вільновихрового насоса.

Для вивчення процесу вихороутворення у працях [46 – 48] запропоновано виконати закруглення кромки лопаті робочого колеса з робочого і тильного боків. Визначено, що при виконанні закруглення лопаті з тильного боку, досягається підвищення напору на 3–4%, а к.к.д. до 3%. Для робочого колеса із закругленням кромки з тильного боку лопаті поперечний вихор, що зривається з її торця, додатково передає енергію основного потоку у вільній камері.

У праці [49] з метою регулювання параметрів насоса в широкому діапазоні запропоновано конструктивне виконання робочого колеса з можливістю переміщення лопатей у радіальному напрямку. При цьому лопаті встановлюються у пазах диска робочого колеса і фіксуються змінними кільцями. Запропонована конструкція робочого колеса дозволяє змінювати його діаметр, в результаті чого забезпечуються напірні характеристики в широких діапазонах при високому значенні к.к.д. насоса.

У працях [4, 5, 14, 50, 51] досліджено вплив конструкції профільованих лопатей робочого колеса з різними кутами установлення лопаті в плані на вході β_1 та виході β_2 на робочі параметри насосів СВН. Було визначено, що зменшення цих кутів дозволяє підвищити к.к.д. вільновихрових насосів, але зменшення кута установлення лопаті на виході з робочого колеса β_2 призводить до зменшення напору насоса.

На підставі одержаних у літературному огляді даних запропонована конструкція робочого колеса (рис. 5), що характеризується підвищеними показниками енергоефективності [52]. Проведені дослідження насоса з використанням такого робочого колеса дозволили підвищити його к.к.д. на 4 – 5% порівняно з діючою конструкцією робочого колеса [53].

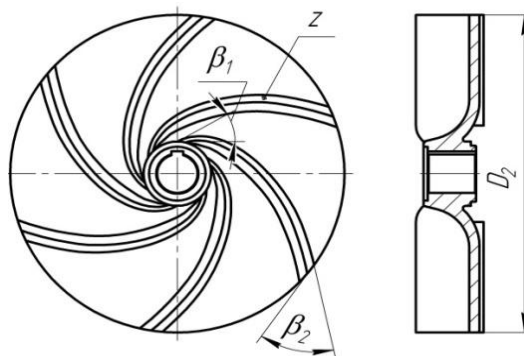


Рис. 5. – Конструкція запропонованого робочого колеса

Результати попередніх досліджень впливу конструкції профільованих лопатей на робочі параметри вільновихрових насосів недостатні. Не встановлено оптимальні розміри кутів установки лопаті в плані на вході β_1 та виході β_2 робочого колеса, а також їх співвідношення.

Визначений напрямок дослідження в подальшому необхідно доповнити проведенням повного факторного експерименту, що дозволить одержати оптимальні значення кутів установки лопаті в плані на вході β_1 та виході β_2 робочого колеса, які дозволять отримати максимальні значення напору та к.к.д. насосів СВН, а також ступінь впливу кожного фактора на робочі параметри насоса.

Висновки

1. Розглянуті джерела інформації дозволили визначити основні напрямки вдосконалення вільновихрових насосів.
2. Для забезпечення зменшення вартості життєвого циклу існуючих насосів і насосів, що виробляються, пропонуються заходи з удосконалення конструкції робочого колеса.
3. На підставі аналізу відомих рішень розроблено робоче колесо, що забезпечує підвищення к.к.д. насоса на 4 – 5% у порівнянні з діючою конструкцією робочого колеса.
4. За напрямок подальшого дослідження пропонується проведення повного факторного експерименту для визначення оптимальних значень кутів установки лопаті в плані на вході β_1 та виході β_2 робочого колеса.

Список літератури

1. Герман В.Ф. Свободновихревые насосы : учеб. пособ. / В.Ф. Герман, И.А. Ковалев, А.И. Котенко; под. общ. ред. А.Г. Гусака. - 2-е изд., доп. и перераб. - Сумы : СумГУ, 2013. - 159 с.
2. WEMCO® Torque-Flow [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.global.weir/products/product-catalogue/wemco-torque-flow>.
3. Egger E. Einsatz Von Turo-Pumpen in der Industrie mit spezieller Berücksichtigung des Einsatzes für stark schillibende Fordergüter. – Pumpen und Verdichterinformattionen. – 1967. №2. – 11 с.
4. Rüttschi K. Die Arbeitsweise von Freistrompumpen/ K.Rüttschi //Bauzeitung, Schweiz. – 1968. – Vol. 86, №. 32. – S. 575–582.
5. Скивли Г. П. Теоретическое и экспериментальное исследование вихревого насоса / Г. П. Скивли, Я. Л. Дюссор //Труды американского общества инженеров-механиков (ASME). – 1970. – № 4. – С. 192–202.
6. Grabow G. Einflub der Beschafelung auf das Kennlinienverhalten von Freistrompumpen/ G. Grabow // Pumpen und Verdichter. – 1972. – № 2. – S. 18–21.
7. Капелюш А. Н. Анализ рабочего процесса свободновихревого насоса / А. Н. Капелюш // Гидравлическая добыча угля : ЦНИИГЭИ угля : сб. науч. тр. – 1966. – Вып. 7. – С. 65–77.
8. Пресман Л.С. Смерчевые (свободо-вихревые) насосы/ Л.С. Пресман // Труды ВНИИГидромаша. – 1967. – № 36. – С. 46–65.
9. Fitero J. Consideratii asupra pompelor cu rotor retrasutilizabile in instalatiile de epnismet/ J.Fitero, F.Gynlai //Buletinulstiintificsitehnic al InstitutuluiPolitehnic "Traian Vuia"(Timisoara). – Seria "Mecanica". – 1977. – Vol. 22(36), № 1. – S. 98–102.
10. Евтушенко А.А. Основы теории рабочего процесса вихревых гидромашин / А. А. Евтушенко // Технологические системы. – 2002. – № 2 (13). – С. 110–113.
11. Соляник, В.О. Робочий процес і енергетичні якості вільновихрових насосів типу «TURO» : автореферат. канд. техн. наук: спец. 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати / В.О. Соляник. – Суми : Сумський державний університет, 1999. - 19 с.
12. Евтушенко А. А. Рабочий процесс свободновихревого насоса типа «TURO» /А. А. Евтушенко, В. А. Соляник // Вестник НТУУ «КПИ». – 1999. – № 34. – С. 346–355.
13. Пат. 3294026 США, МПК F04d 29/44, F04d 7/00. Vortexpump / LobanoffS. (США). – №537501; заявл. 30.09.1963; опубл. 27.12.1966. – 6 с.
14. Пат. 4135852 США, МПК F04D 7/00. Centrifugal slurry pump and method / ArchibaldW.R. (США). – №782226; заявл. 28.03.1977; опубл. 23.01.1979. – 9 с.
15. Пат. 37350 Україна, МПК (2006) F04 D 1/00. Вільновихровий насос / Владімірський Е. С. (Україна) – №37350А; заявл. 29.12.1999; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4.
16. Пат. 99588 Україна, МПК (2006.01) F04 D 7/04. Вільновихровий насос / Криштоп І.В., Герман В. Ф., Гусак О. Г. (Україна) – №u201500091; заявл. 06.01.2015; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 11.
17. Пфлейдерер К. «Лопаточные машины для жидкостей и газов» / К. Пфлейдерер ; перевод А.М.Ладогина под ред. Поликовского В.И., 4 изд. перераб. – М.: Государственное научно-техническое издание, 1960 – 683 с.
18. Пат. 3322070 США, МПК F04d 29/44, F04d 7/00. Vortexpump / GlassK.E. (США) / №446515; заявл. 08.04.1965; опубл. 30.05.1967. – 3 с.

19. Каталог насосного обладнання компанії VOGEL PUMPEN [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.vogelpumpen.com/vogdata/doc/EN/kswwts_05-eden.pdf.
20. Пат. 66149 А Україна, МПК (2006) F04 D 5/00. Вільновихровий насос / Кондаков А. Ф., Чернявський В.І., Костіков І. П., Ікол Ю. А., Коваль В. К. (Україна) – № 2003087376; заявл. 05.08.2003; опубл. 15.04.2004, Бюл. № 4.
21. Пат. 4338062 США, МПК F04D 29/24. Adjustable vortex pump / Neal M. J. (США). – №140161; заявл. 14.04.1980; опубл. 06.07.1982. – 10 с.
22. Ткачук Ю.Я. Использование принципов лсс при выборе насоса для перекачки абразивных суспензий / Ю.Я. Ткачук, С.А. Лобан, Е.В. Шатрюк // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. - 2012. - № 4. - С. 28-34.
23. Kotenko A.I. Rationalisation of Ukrainian industrial enterprises in a context of using torque flow pumps on the basis of valuation of the life cycle of pumping equipment / A.I. Kotenko, V.F.Herman, A.A. Kotenko // Nauka i Studia. – 2014. – №16(126) – Р. 83–91.
24. Котенко О.І. Загальні витрати при експлуатації насосів / О.І. Котенко, А.М. Бурдюг // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, Суми, 18–22 квітня 2011 року / ред. кол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. – Суми : СумДУ, 2011. – Ч.3. – С. 118.
25. Пат. 3316848 США, МПК F04d 29/44, F04d 7/00. Pump casing / Egger E. (Швейцарія). – №469781; заявл. 06.07.1965; опубл. 02.05.1967. – 11 с.
26. Пат. 4676718 США, МПК F04D 29/24. Impeller for a pump, especially a vortex pump / Sarvanne H. (Фінляндія). – №740367; заявл. 03.06.1985; опубл. 30.06.1987. – 5 с.
27. Пат. 25569 А Україна, МПК (2006) F04 D 5/00. Вільновихровий насос / Левін Ю. М., Кардакова С. В., Молчанов В. Б., Круглік А. С., Ракітін А. І. (Україна) – № 97062795; заявл. 12.06.1997 ; опубл. 25.12.1998, Бюл. № 6.
28. Пат. 7605 Україна, МПК (2006) F04 D 5/00. Вільновихровий насос / Белашов П. М., Косяненко О. С., Шастун В. Ф. (Україна) – №u200502978; заявл. 31.03.2005; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6.
29. Cervinka M. Computational Study of Sludge Pump Design with Vortex Impeller // Engineering Mechanics. – 2012. – С. 87.
30. Пат. EP0109550 Німеччина, МПК F04D 29/22 Laufradfüreine Freistrompumpe / Heimgartner H., Wirz K. (Швейцарія) – № 19830110411; заявл. 19.10.1983; опубл. 30.05.1984. – 11 с.
31. Пат. 4592700 США, МПК F04D 29/24; F04D 29/40. Vortex pump / Toguchi S., Kobayashi M. (Японія). – №586441; заявл. 05.03.1984; опубл. 03.06.1986. – 9 с.
32. Пат. 20140003929A1 США, МПК F04D 7/04 (2013.01) Free-flow pump / Favre J. N. (Швейцарія), Rengen H. (Німеччина), Grimm M. (Швейцарія) – № 14/003274; заявл. 27.02.2012; опубл. 05.09.2013. – 8 с.
33. Пат. 5486092 США, МПК F04D 17/00. Housing for a vortex-flow type pump / Borg T., Strinning P.E. (Швеція). – №317079; заявл. 03.10.1994; опубл. 23.01.1996. – 5 с.
34. Поиск путей расширения диапазона рабочих параметров свободных револьверных насосов типа «TURO» / В. Ф. Герман, А. Г. Гусак, А. А. Евтушенко, В. А. Панченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4/8(52). – С. 33–37.
35. Пат. 8128360 США, МПК F04D 29/42. Vortex pump with splitter blade impeller / Sensel D.L., Kowalak M. (США). – №12/269416; заявл. 12.11.2008; опубл. 06.03.2012. – 10 с.
36. WEMCO® Screw Centrifugal Pump [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.global.weir/products/product-catalogue/wemco-screw-centrifugal?>
37. Ishii K. et al. Hydrodynamic characteristics of the helical flow pump // Journal of Artificial Organs. – 2015. – Т. 18. – №. 3. – С. 206-212.
38. Герман В.Ф. Влияние геометрических параметров рабочего колеса свободновихревого насоса на его характеристики / В. Ф. Герман, И. А. Ковалев, И. Н. Чебаненко // Гидравлические машины. – Харьков : Вища шк., 1984. – Вып. 18. – С. 75–77.
39. Герман В.Ф. Создание и исследование сточно-массных вихревых насосов повышенной экономичности: дис. канд. техн. наук : спец. 05.04.13 – гидравлические машины и гидропнеумоагрегаты / В.Ф. Герман. - Сумы : Сумский филиал Харьковского политехнического института, 1984. – 154 с.
40. Пат. 1634829 СРСР, МПК³F 04 D 7/04. Свободновихревой насос / Котенко А. И., Дериколенко А. Н., Герман В. Ф., Пеннер В. М. – №4618984/29; заявл. 12.12.1988; опубл. 15.03.1991, бюл. № 10.
41. Герман В. Ф. Расчет параметров свободновихревого насоса / В. Ф. Герман // Гидравлические машины. – Харьков : Вища шк., 1989. – Вып. 23. – С. 81–85.
42. Герман В. Ф. Влияние различных способов доводки рабочего колеса на картину течения и характеристики свободновихревого насоса типа «TURO» / В. Ф. Герман, А. Н. Кочевский, А. Е. Щеляев // Проблемы машиностроения. – 2007. – Том 10, № 1. – С. 24–31.
43. Герман В. Ф. Создание проточных частей свободновихревых насосов повышенной экономичности / В. Ф. Герман, А. Г. Гусак, А. Н. Кочевский // Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2007. – № 3 (109), Частина 1. – С. 53–59.

44. Пат. 1521923 СРСР МПК⁴ F 04 D 29/22. Рабочее колесо свободновихревого насоса / Герман В. Ф., Яхненко С. М., Синеклодецкая Т. Н., Котенко А. И., Копелянский В. Б., Гонсалес Н. Х. – № 4339198/25-29; заявл. 07.12.87; опубл. 15.11.89, Бюл. № 42. – 3 с.
45. Пат. 106416 СРСР, МПК⁴F 04 D 7/04. Рабочее колесо свободновихревого насоса / Вертячих А. В., Герман В. Ф., Евтушенко А. А., Караханьян И. А., Ковалев И. А., Копелянский В. Б., Кузнецов О. В., Цай А. М. – № 3774186/25-06; заявл. 17.07.1984; опубл. 07.02.1987, бюл. № 5.
46. Пат. 1576733 СРСР МПК⁵F 04 D 29/18, 7/04. Рабочее колесо свободновихревого насоса / Котенко А. И., Дериголенко А. Н. – №4466096/31-29; заявл. 26.07.1988; опубл. 07.07.1990, бюл. № 25.
47. Оценка влияния поперечных вихрей на процессы передачи энергии в свободновихревом насосе / И. В. Криштоп, В. Ф. Герман, А. Г. Гусак, Л. М. Салтанова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. - 2015. - № 6. - С. 49-56.
48. Пат. 98924 Україна, МПК (2006.01) F04 D 7/04. Вільновихровий насос / Криштоп І. В., Герман В. Ф., Гусак О. Г. (Україна) – № u201413065; заявл. 05.12.2014; опубл. 12.05.2014, бюл. № 9.
49. Пат. 86009 Україна, МПК (2006.01) F04 D 7/04. Вільновихровий насос / Котенко О. І., Герман В. Ф., Ніколаєнко Л. М. (Україна) – №u201307154; заявл. 06.06.2013; опубл. 10.12.2013, бюл. № 23.
50. Пат. 3759628 США, МПК F04d 29/44, F04d 7/00. Vortex pumps / Kempf D. D.(США)/ – №262913; заявл. 14.06.1972; опубл. 18.09.1973. – 13 с.
51. Gerlach A., Thamsen P. U., Lykholt-Ustrup F. Experimental investigation on the performance of a vortex pump using winglets //Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Honolulu, HI, USA. – 2016. – С. 10-15.
52. Пат. 1288357 Україна, МПК F04D 29/34 (2006.01). Робоче колесо вільновихрового насоса / В.Ю. Кондусь, О.І. Котенко (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. – № u201510522; заявл. 28.10.2015; опубл. 25.04.2016, бюл. № 8.
53. Котенко О.І. Проектування робочого колеса вільновихрового насоса з криволінійним профілем лопаті з використанням методу чисельного дослідження [Текст] / О.І. Котенко, В.Ю. Кондусь // Журнал інженерних наук. - 2016. - Т.3, №1. - С. В9 - В16.

Стаття надійшла до редакції 17.03.2017