

У роботі розроблена методика проектування корпусу вільновихрового насоса (ВВН) з неспіввісною спіраллю. Проведено чисельний розрахунок, за результатами якого отримані картини розподілу швидкостей і тисків у проточній частині ВВН з кільцевим і неспіввісним спіральним відводами. З урахуванням аналізу чисельного експерименту розроблена і випробувана конструкція ВВН з неспіввісним спіральним відводом

Ключові слова: вільновихровий насос, неспіввісна спіраль, чисельне моделювання, коефіцієнт швидкохідності, нерівномірність потоку

В работе разработана методика проектирования корпуса свободновихрового насоса (СВН) с несоосной спиралью. Проведен численный расчет, по результатам которого получены картины распределения скоростей и давлений в проточной части СВН с кольцевым и несоосным спиральным отводами. С учетом анализа численного эксперимента разработана и испытана конструкция СВН с несоосным спиральным отводом

Ключевые слова: свободновихровой насос, несоосная спираль, численное моделирование, коэффициент быстроходности, неравномерность потока

СОЗДАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СВОБODНОВИХРЕВОГО НАСОСА ПОВЫШЕННОЙ ЭНЕРГО- ЭФФЕКТИВНОСТИ

И. В. Криштоп

Аспирант

Кафедра прикладной гидроаэромеханики
Сумской государственной университет
ул. Римского-Корсакова 2,
г. Сумы, Украина, 40007
E-mail: kryshtopihor@gmail.com

1. Введение

Насосостроение является одним из наиболее актуальных и наукоемких составляющих машиностроительной промышленности Украины. На данный момент отечественное насосостроение позволяет обеспечить как внутривосударственные нужды, так и удовлетворить экспортный спрос.

Среди насосов гидродинамического принципа действия особое место занимают свободновихровые насосы. Их появление потребовало внести изменения в классификацию динамических насосов, выделив в отдельную группу насосы вихревого принципа действия.

Область использования СВН обусловлена наличием свободной от вращающихся деталей проточной части, которая позволяет перекачивать продукты с минимальным их повреждением. В работе [1] акцентируется внимание на целесообразности более широкого применения СВН в различных отраслях промышленности при перекачивании кристаллических суспензий и вязких износосодержащих жидкостей: загрязненных смол, сточных вод, канализационного ила, пищевых продуктов и т. п.

В настоящее время, для повышения конкурентоспособности насосов свободновихревого типа на рынке решаются различные задачи в области их проектирования, в частности, совершенствования проточной части.

Основными задачами являются: повышение напора; достижение максимально возможного КПД для заданного коэффициента быстроходности; уменьшение износа деталей проточной части; увеличение жизненного цикла СВН; уменьшение себестоимости насоса; унификация проточных частей СВН путем перехода к блочно-модульной конструкции.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Базовые конструкции СВН (Wemco, Turo, Seka) известны давно и широко применяются в различных отраслях промышленности. Эти насосы активно выпускаются целым рядом зарубежных фирм (Egger, Blaskmer, Wemco pump, Edur, Garbarino, KSB и др.). В нашей стране исследования СВН ведутся с 70-х годов прошлого века. Множество наработок в этой области позволило создать целый ряд насосов вихревого принципа действия, выпускаемых такими предприятиями, как ПАО «Сумский завод «Насосэнергомаш», Украина; ООО «Гидрокомпрессор», Россия и др. С учетом зарубежных разработок среди конструкций СВН наибольшее количество выпускается насосов типа «Turo» [1, 4].

Рабочий процесс СВН является достаточно сложным и до конца не изученным, поэтому, дальнейшие

работы должны быть направлены на более детальное исследование этого процесса, и совершенствование конструкции насоса [5].

Ввиду возрастающей потребности применения СВН во многих отраслях промышленности в последнее время возобновились работы по их исследованию с применением численных методов [6]. Численные исследования позволило более детально изучать процессы кавитации в СВН [7] и вопрос износа проточной части [8].

Использование конструкции насоса свободновихревого типа взамен центробежного при перекачивании абразивных и коррозионных включений позволило значительно увеличить ресурс работы насоса, уменьшить потребность в запасных частях, стоимость технического обслуживания и ремонта, несмотря на 15–20 % уменьшение КПД по сравнению с применяемыми для этих целей центробежными насосами.

В практике отечественного насосостроения при проектировании насосов получил распространение коэффициент быстроходности n_s , характеризующий КПД насоса, форму его проточной части, а также соотношение её геометрических размеров. Известно, что оптимальная работа СВН типа «Tуго» ограничена узким интервалом коэффициентов быстроходности. Наиболее высокая экономичность достигается в области $n_s=80–140$, в которой значение КПД отечественных насосов составляет $\eta=0,5–0,52$ [2]. При работе насосов в областях малой или высокой быстроходности наступает резкое снижение их КПД. По исследованиям [3, 4] даже значительное изменение конструктивных параметров насоса вызывает сравнительно небольшое изменение коэффициента быстроходности насоса. При малых коэффициентах быстроходности (узких свободных камерах) СВН теряет главное свое преимущество – широкие проходные каналы.

Наличие сложного пространственного течения в проточной части СВН привело к многообразию гипотез рабочего процесса этих насосов. За последние годы выработалась единая концепция интерпретации рабочего процесса СВН. Процесс передачи энергии в них протекает в два этапа. На первом этапе, по аналогии с центробежными насосами, энергия передается от лопастей колеса протекающей через него жидкости. Далее, получившая приращение энергии жидкость, выходит из колеса и взаимодействует с потоком жидкости в свободной камере. Выходящий из колеса поток называют меридианным или продольным вихрем.

В работе [9] на основании проведенного зондирования потока утверждается, что в свободной камере СВН происходит многократная (до 2–3-х оборотов) циркуляция жидкости в отличие от центробежных насосов, в которых частицы жидкости кратчайшим путем проходят через рабочее колесо (РК) в отвод и далее в напорный патрубок. Такой характер движения подтвержден и в работе [10]. Поэтому, при разработке энергоэффективных СВН необходимо учитывать не плоское, а трехмерное пространственное течение жидкости.

При оптимальной геометрии РК быстроходность и КПД СВН однозначно определяются геометрией отвода. Автор работы [3] экспериментально установил, что величина площади выходного сечения су-

щественно влияет на рабочие параметры СВН, а при оптимальной геометрии РК почти однозначно определяет быстроходность и КПД насоса. Увеличение площади выходного сечения приводит к росту ширины камеры СВН. При увеличенной ширине камеры \bar{V} ($\bar{V}=V/D_2$) происходит уменьшение скорости вращения жидкости в свободной камере, что приводит к росту количества циклов вращения жидкости в ней, а также увеличению гидравлических потерь в насосе [2]. В узких камерах эти потери вызваны высокими скоростями жидкости. Сходимость этих процессов обуславливает наличие оптимальной величины \bar{V} .

Рассмотрим течение жидкости в СВН, которое в отличие от центробежного насоса имеет сложный пространственный характер. Исследования [11, 12] указывают на наличие в проточной части СВН вихревого течения, параметры которого изменяются с течением времени. Однако, кроме проблем, связанных с нестационарным вихревым движением в камере насоса, как показывают результаты [1], для СВН существуют проблемы, связанные с неравномерностью потока в отводящем канале корпуса насоса. Окружная неравномерность распределения скоростей на входе в отвод СВН, приводит к падению напора и КПД, что не позволяет достичь заданных параметров насоса даже при правильном проектировании его проточной части (ПЧ). Особенно это характерно для насосов высокой быстроходности. В связи с этим, для повышения эффективности СВН, особенно на режимах высокой быстроходности, необходимо создать отвод с малой окружной неравномерностью скорости на входе.

Ввиду конструктивных особенностей насоса типа «Tуго» (РК находится в расточке корпуса) в камере наблюдается радиальная неравномерность потока, вызванная меридианным течением жидкости, выходящим из колеса. При этом радиальная неравномерность влияет на величину вихревых потерь в камере, и тем самым, снижает гидравлический КПД насоса.

3. Цель и задачи исследования

Указанные особенности СВН требуют продолжения поиска путей их усовершенствования, в частности конструкции насосов «Tуго». Выше было показано, что эксплуатация этих насосов с максимальным уровнем КПД ограничена узким диапазоном быстроходностей $n_s=80–140$. Поэтому, целью работы является поиск путей расширения диапазона использования СВН для высоких значений коэффициентов быстроходности $n_s > 140$ путем изменения конструкции его корпуса.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- исследование известных и поиск новых технических решений для создания СВН типа «Tуго» высокой быстроходности;
- разработка методики проектирования корпуса с несоосной спиралью;
- проведение численных исследований и оценка предложенных вариантов корпусов насоса;
- проведение физических испытаний модельных образцов корпусов с целью окончательной оценки их эффективности.

4. Методика проектирования конструкции корпуса с несоосной спиралью

Решением поставленной задачи по созданию СВН типа “Туго” высокой быстроходности является переход от классического кольцевого отвода к спиральному, который позволяет устранить окружную неравномерность потока на входе в отвод.

Структура потока в отводе имеет пространственный характер, преобразование энергии в нем является очень сложным процессом. Движение жидкости в отводе насоса можно рассматривать как свободный спиральный вихрь, состоящий из радиального и окружного потоков. Радиальная V_r и окружная V_u скорости являются слагаемыми абсолютной скорости V потока и изменяются пропорционально углу α , образованному вектором абсолютной скорости и касательной к окружности.

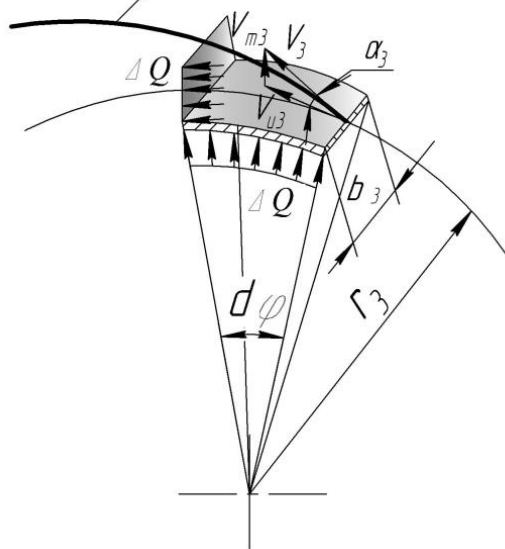
Выходя из РК, жидкость в СВН движется в радиальном и окружном направлениях. В случае равномерного распределения потока за РК его кинематика характеризуется углом между меридианной V_{m3} и окружной V_{u3} составляющими абсолютной скорости (рис. 1):

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{V_{m3}}{V_{u3}}. \quad (1)$$

Угол установки стенки спирального отвода должен совпадать с углом α_3 , при котором течение жидкости будет безударным. В этом случае жидкость за РК будет двигаться с наименьшим сопротивлением и контур отвода соответствовать траектории движения элементарной струйки жидкости.

Недостатком же кольцевого отвода является то, что его стенка имеет постоянный угол установки, который не будет совпадать с изменяющимся углом натекающего потока α_3 , и это приводит к ударным потерям.

границная линия спирали



Траектория движения жидкости при установившемся течении совпадает с линией тока, которую для цилиндрической системы координат можно записать в виде:

$$\frac{r d\varphi}{V_u} = \frac{dr}{V_r}. \quad (2)$$

При конструировании центробежных насосов, компрессоров и вентиляторов считается, что поток движется без потерь, и применяется закон постоянства момента скорости $V_u r = \text{const}$ [13]. Этот метод устанавливает зависимость между изменением окружной скорости и радиусом меридианного сечения. При этом, по ширине сечения скорость остается постоянной.

С другой стороны, радиальную составляющую абсолютной скорости можно найти из условия неразрывности:

$$dQ = V_{r3} b r_3 d\varphi = V_r b r d\varphi. \quad (3)$$

Тогда, с учетом (3) из уравнения (2) получаем:

$$dr = \frac{r}{bK} dQ, \quad (4)$$

где $K = V_u r$ – постоянный момент скорости.

Уравнение (4) характеризует величину подъема спирали dr в каждом сечении при угле поворота $d\varphi$ (рис. 2, а).

Для устранения радиальной неравномерности потока на входе отвод необходимо поверхность входа расположить под углом к оси насоса (рис. 2, б). Построение спирали с несоосным меридианным сечением выполняется относительно средней линии, в этом случае формула (4) примет вид:

$$dl = \frac{r}{bK} dQ, \quad (5)$$

где dl – величина смещения сечения по средней струйке.

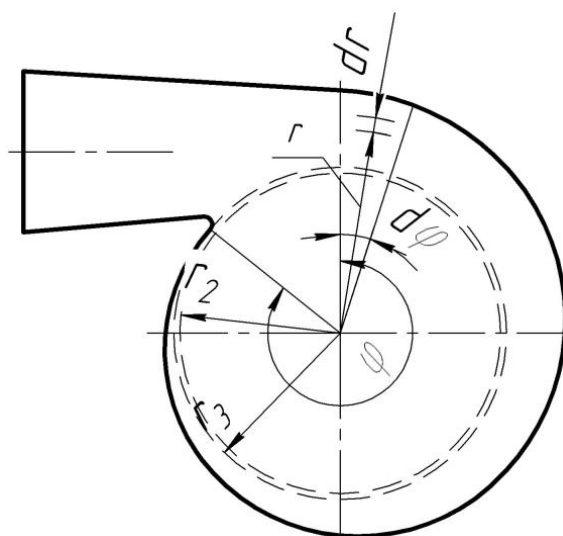


Рис. 1. Кинематические параметры потока жидкости на входе в отвод

Угол наклона поверхности входа в спираль β следует принимать согласно рекомендации [14].

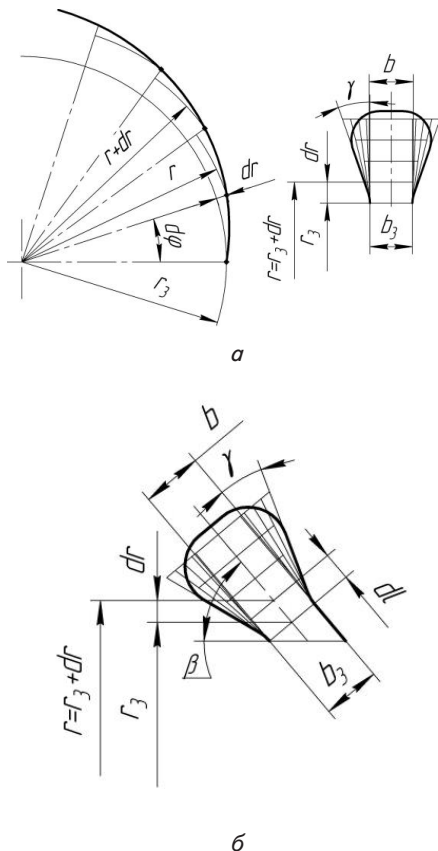


Рис. 2. Расчетная схема спирального отвода:
 а – построение плана спирали с соосным поперечным сечениям; б – построение несоосных поперечных сечений спирали

5. Результаты исследований конструкций корпуса СВН

Проектирование спирального корпуса проводилось методом численного моделирования в программном комплексе ANSYS CFX университетской версии. При моделировании условий работы СВН использовалась расчетная область, состоящая из корпуса насоса и рабочего колеса.

Расчетная сетка в РК насчитывала около 1,63 млн. призматических ячеек, в корпусе – 1,86 млн. ячеек. Перед проведением исследований для каждого элемента расчетной области была выполнена проверка сеточной независимости. Величина переменной $Y+$ находилась в пределах от 1 до 20 ед., что соответствовало рекомендациям, приведенным в руководстве пользователя [15].

Для моделирования турбулентности была использована стандартная SST модель Ментера [16].

Для проведения исследований было спроектировано и изготовлено три варианта корпуса СВН (рис. 3):

- Вариант № 1 – кольцевой корпус, $n_s=112$.
- Вариант № 2 – кольцевой расширенный корпус, $n_s=168$.
- Вариант № 3 – корпус с несоосной спиралью, $n_s=168$.

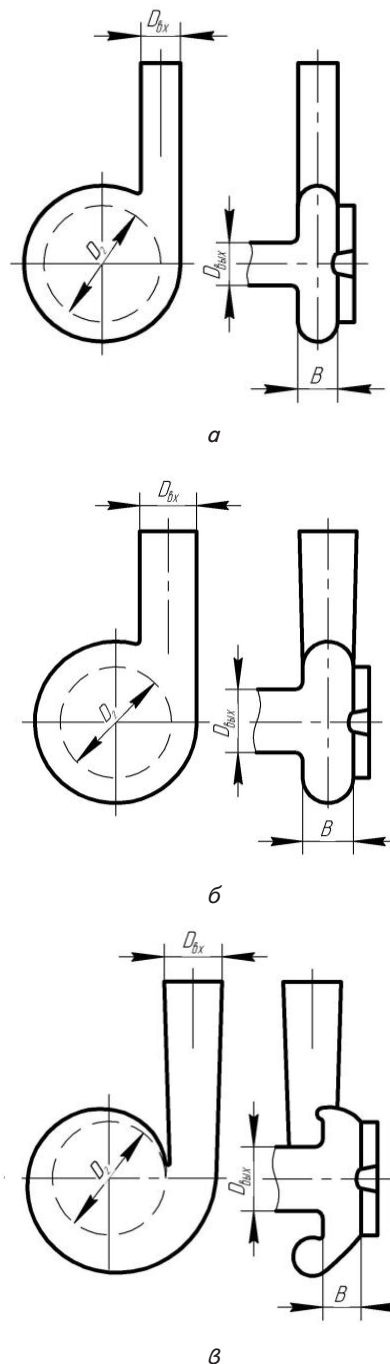


Рис. 3. Схемы исследованных ПЧ свободновихревых насосов: а – кольцевой корпус; б – кольцевой расширенный корпус; в – корпус с несоосной спиралью

В результате численного моделирования получены картины течения жидкости в исследованных вариантах корпусов в плоскостях, одна из которых проходит через середину свободной камеры насоса (рис. 4, а, б), а другая – перпендикулярна оси его напорного патрубка (рис. 5, а, б).

Анализируя картины течения жидкости в отводах на плоскости, размещенной посередине свободной камеры насоса, можно сделать вывод, что для корпуса № 1 распределение абсолютной скорости и давления равномерное в окружном направлении. Для корпуса № 2 наблюдаются локальные зоны повышения скоро-

сти. Распределение давления указывает на возможные места отрывных течений. Для конструкции корпуса с несоосной спиралью № 3 абсолютная скорость и давление имеют равномерное распределение в окружном направлении. Течение становится установившимся, в результате чего уменьшается величина потерь, связанных с вихреобразованием потока.

Для корпусов № 1 и 2 наблюдается локальное повышение скорости на выходе из РК, что, по-видимому, приводит к образованию застойной вихревой зоны (рис. 5, *a*). Картина распределения абсолютной скорости в корпусе № 3 указывает на увеличение этой скорости в камере насоса, что можно объяснить меньшей шириной камеры по сравнению с корпусом № 2. Данное увеличение скорости приводит к росту интенсивности обмена энергией в насосе. Распределение давлений в меридианном сечении корпуса № 3 равномерное. Полученные результаты указывают на целесообразность применения отвода СВН с несоосной спиралью.

Для получения напорных и энергетических характеристик исследуемых отводов было принято решение о проведении натурных испытаний. Насосы с модельными отводами были испытаны согласно общепринятой методике [17] на специально разработанном экспериментальном стенде, принципиальная схема которого приведена на рис. 6, *a, б*.

Испытания проводились на частоте вращения вала 2250 об/мин.

Модельный насос СВН 60/20 с кольцевым корпусом №1 был спроектирован на параметры: $Q=60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H=20 \text{ м}$ ($\bar{Q}=0,034$, $\bar{H}=0,924$) и имел коэффициент быстроходности $n_s=112$, который соответствовал области наибольшего значения КПД. Испытания показали, что оптимальный уровень КПД ($\eta=0,505$) находится в предполагаемой области быстроходностей (рис. 7).

Проточная часть СВН с расширенным корпусом №2 спроектирована на параметры: $Q=125 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H=28 \text{ м}$ ($\bar{Q}=0,053$, $\bar{H}=0,728$) и соответствовала коэффициенту быстроходности $n_s=168$. При испытаниях КПД насоса составил $\eta=0,435$, что подтвердило ожидаемое снижение уровня КПД на 7 % по сравнению с корпусом № 1, и соответствует результатам работы [18], в которой подчеркивается, что с увеличением ширины свободной камеры, и соответственно n_s , КПД насосов типа "Туго" снижается.

Оптимальный режим работы насоса $Q=100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($\bar{Q}=0,042$) не соответствовал расчетному. Несовпадение режимов можно объяснить тем, что с увеличением ширины корпуса происходит изменение структуры потока в насосе.

При испытаниях СВН с несоосным спиральным корпусом № 3 уровень КПД повысился до $\eta=0,475$. Приращение КПД по сравнению с корпусом № 2 составило 4 %. Оптимальный режим соответствовал области расчетного значения коэффициента быстроходности – $n_s=168$.

Эксперименты также показали, что с ростом коэффициента быстроходности крутизна напорной характеристики СВН возрастает, а оптимальный режим работы сдвигается вправо в сторону больших подач.

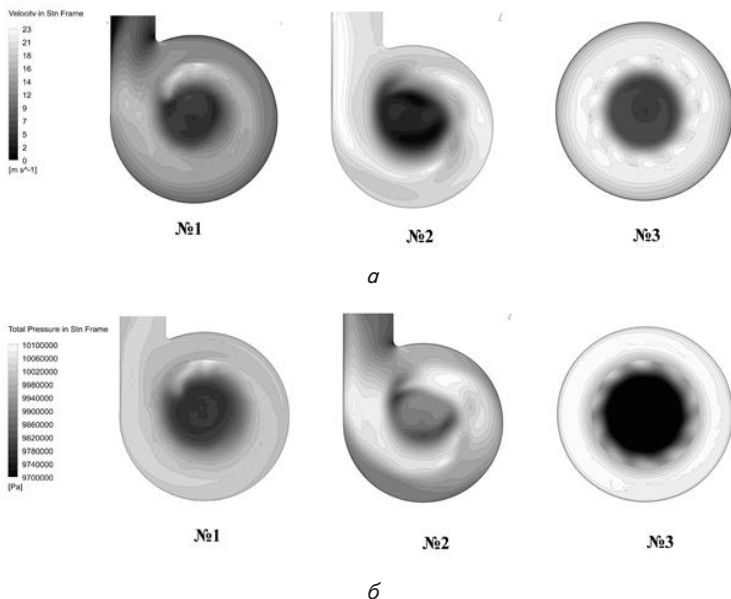


Рис. 4. Картины течения жидкости в отводах СВН на плоскости, проходящей через середину камеры: *a* – распределение абсолютной скорости; *б* – распределение давлений

Картины течения жидкости в отводах на плоскости, перпендикулярной оси напорного патрубка представлены на рис. 5, *a, б*.

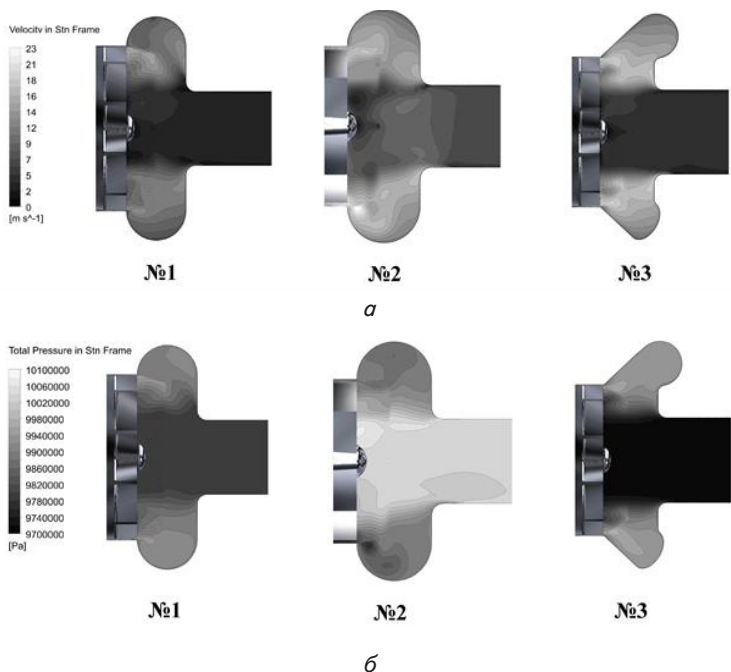
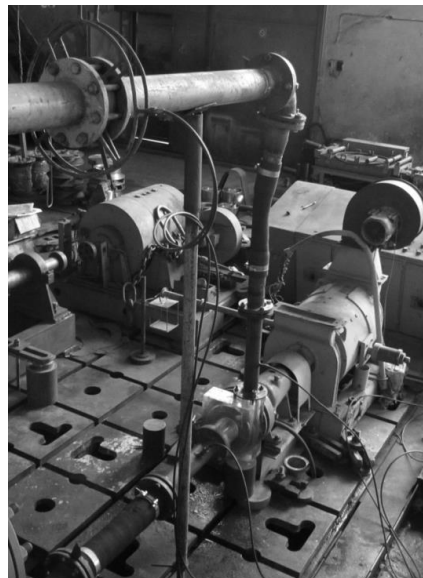
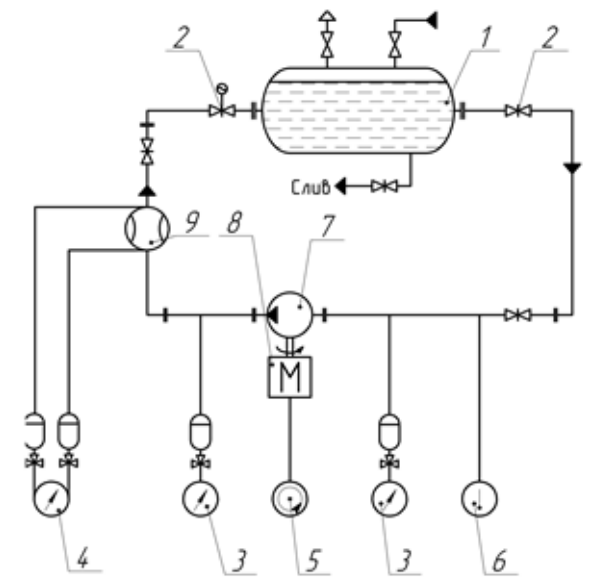


Рис. 5. Картины течения жидкости в отводах СВН на плоскости, перпендикулярной оси напорного патрубка: *a* – распределение абсолютной скорости; *б* – распределение давлений



а

б

Рис. 6. Экспериментальный стенд: а – гидравлическая схема стенда: 1 – бак, 2 – задвижка, 3 – манометр, 4 – дифманометр, 5 – тахометр, 6 – термометр, 7 – экспериментальный насос, 8 – балансирующая машина, 9 – расходомерное устройство; б - общий вид стенда

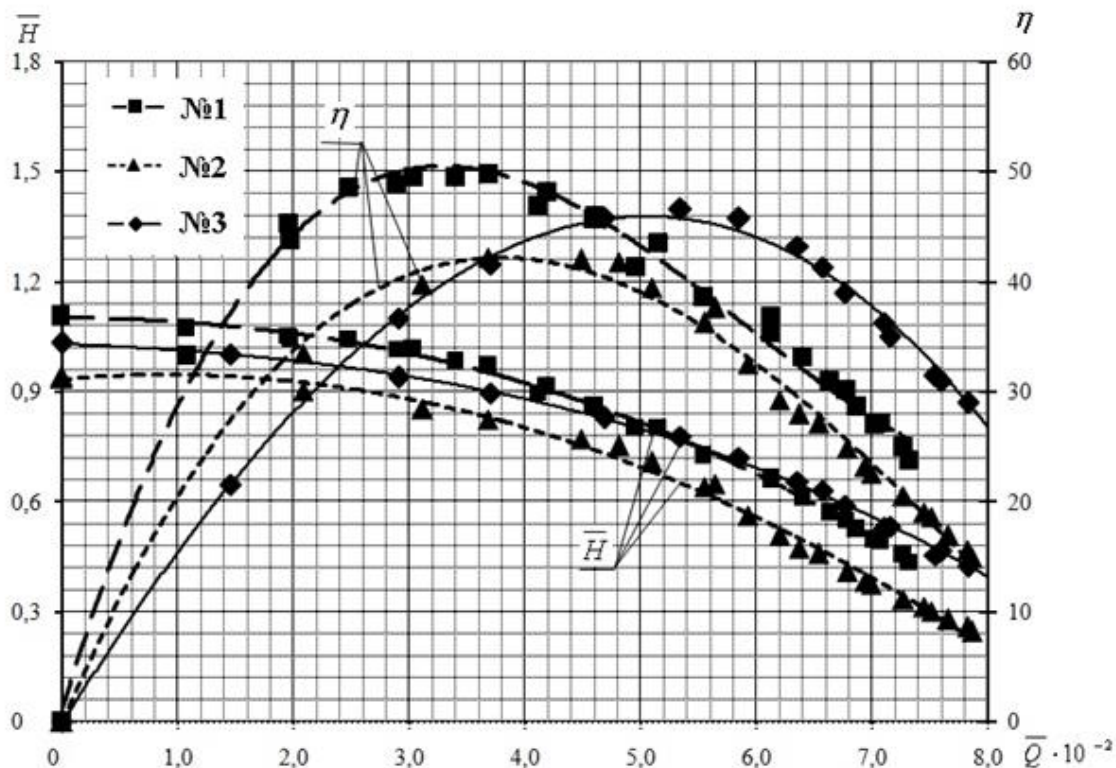


Рис. 7. Характеристики модельных корпусов: $\bar{H} = \frac{7200 \cdot gH}{\pi^2 \cdot n^2 D_2^2}$ – безразмерный напор;
 $\bar{Q} = \frac{240 \cdot Q}{\pi^2 \cdot n D_2^3}$ – безразмерная подача

7. Выводы

Проведенный анализ показал, область применения СВН с высоким коэффициентом быстроходности может быть расширена за счет изменения конструкции корпуса.

Разработана методика проектирования СВН типа “Туго” с несосным спиральным отводом высокой быстроходности $n_s=160-180$, что позволяет снизить стоимость жизненного цикла насоса путем достижения более высоких значений КПД.

По результатам численного исследования получены картины распределения скоростей и давлений, позволяющие сделать вывод об эффективности применения корпуса с несоосным спиральным отводом.

Эксперименты показали, что СВН, имеющий отвод с несоосной спиралью, является энергoeffективным, поскольку на 4 % повышает КПД по сравнению насосом, имеющими кольцевой отвод.

В ходе проведения испытаний было установлено незначительное изменение КПД СВН с несоосным спиральным отводом в интервале рабочих подач, что позволяет расширить область их применения.

На разработанную конструкцию СВН с несоосным спиральным отводом получен патент на полезную модель [14].

Литература

1. Egger, E. Verstopingsvrije wervelwaaierpompen [Text] / E. Egger // Klaarmeester. – 1976. – Vol. 11, Issue 2. – P. 2.
2. Герман, В. Ф. Свободновихревые насосы [Текст] : учеб. пособие / В. Ф. Герман, И. А. Ковалев, А. И. Котенко; под общ. ред. А. Г. Гусака; 2-е изд., перераб. и доп. – Сумы: Сумской государственной университет, 2013. – 159 с.
3. Корбутовский, А. А. Влияние геометрии отвода на рабочие параметры свободновихревого насоса [Текст] / А. А. Корбутовский // Исследование, расчет и технология изготовления гидромашин: ВНИИГидромаш: сбор. науч. тр., 1977. – С. 40–52.
4. Sha, Y. Self-priming Vortex Pump Variable Speed Performance and Internal Flow [Text] / Y. Sha, J. Li, X. Liu, L. Hou, F. Cheng. – Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009 – 12 p.
5. Shi, W. Numerical simulation of the effect of channel section shape on the inner flowing of vortex pump [Text] / W. Shi, Y. Dong, X. Ma, Y. Sha, F. Kong. - Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005 – P. 03.
6. Yuan, D.-Q. Research status and prospect of vortex pump [Text] / D.-Q. Yuan, G.-J. Wang, X.-Y. Cheng, X.-C. Zhang, X.-W. Zyfng. – Drainage and Irrigation Machinery, 2008 – P. 06.
7. Steinmann, A. Numerical and experimental investigations of the
8. unsteady cavitating flow in a vortex pump [Text] / A. Steinmann1, H. Wurm, A. Otto // ICHD. – 2009. – Vol. 21, Issue 2. – P. 299–300.
9. WEMCO Pumps and systems [Electronic resource] / Available at: <http://etec-sales.com/pdf/WEMCOModelCTorqueFlow-Pumps.pdf/> – 2009, Bulletin, P10-B75.
10. Grabow, G. Einsatz von Friestrompumpen zur Forderung abrasive Medien [Text] / G. Grabow // Pumpen and Verdichter-Informationen. – 1970. – Vol. 1. – P. 53–55.
11. Капелюш, А. Н. Исследование рабочего процесса насосов свободно-вихревого типа с помощью скоростной киносъемки [Текст] / А. Н. Капелюш // Гидравлическая добыча угля : ЦНИИТЭИ угля : сбор. науч. тр. – 1965. – Вып 11. – С. 35–37.
12. Герман, В. Ф. Исследование структуры потока в свободновихревом насосе [Текст] / В. Ф. Герман // Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты: теория, расчет, конструирование: темат. сб. науч. тр. – Киев : ИСИО. – 1994. – С. 67–81.
13. Евтушенко, А. А. Развитие теории рабочего процесса, практики конструирования и применения динамических насосов [Текст]: монография / А. А. Евтушенко. – Сумы: Сумский государственный университет, 2013. – 515 с.
14. Ломакин, А. А. Центробежные и осевые насосы [Текст] / А. А. Ломакин. – М. : Машиностроение, 1966. – 364 с.
15. Свободновихревой насос. Декларационный патент Украины на полезную модель МПК F04D 7/04 [Текст] / Криштоп И. В., Герман В. Ф., Гусак А. Г., Луговая С. О. – № 84940; заявл. 01.04.13; опубл. 11.11.13, Бюл. № 21.
16. ANSYS CFX 10.0 SolverModels. Release 10.0 [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ansys.com/> - 2008. – 549 p.
17. Krishtop, I. Numerical Approach for Simulation of Fluid Flow in Torque Flow Pumps [Текст] / I. Krishtop, V. German, O. Gusak, S. Lugova, A. Kochevsky // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 630. – P.43–51. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.630.43
18. ГОСТ 6134-2007. Насосы динамические. Методы испытаний. [Текст] / Введ. 2008-06-01. - М. : Изд-во стандартов, 2007. – 100 с.
19. Герман, В. Ф. Создание и исследование сточномассных свободновихревых насосов повышенной экономичности [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В. Ф. Герман. – Суми, 1984. – 154 с.