

УДК 532.5:621.65.01

Н. Г. ШЕВЧЕНКО, А. Л. ШУДРИК, Е. Ю. БОНДАРЕНКО**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СТУПЕНИ ПОГРУЖНОГО НАСОСА ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ**

Проведено аналіз особливостей робочого процесу заглибного електровідцентрового насоса при перекачуванні газорідних сумішей. Дано рекомендації по вибору типу розрахункової сітки і вибору параметрів турбулентності, а також вирішувача для розрахунків мультифазних течій в програмі *OpenFOAM*. Отримано залежності втрат напору при наявності в перекачуваній рідині газу. Наведено візуалізація течії газорідної суміші в ступені.

Ключові слова: відцентровий насос, ступінь, протягом газорідної суміші, математична модель, модель турбулентності, напір, структурована сітка.

Проведен анализ особенностей рабочего процесса погружного электроцентробежного насоса при перекачке газожидкостных смесей. Даны рекомендации по выбору типа расчетной сетки и выбору параметров турбулентности, а также решателя для расчетов мультифазных течений в программе *OpenFOAM*. Получены зависимости потерь напора при наличии в перекачиваемой жидкости газа. Приведена визуализация течения газожидкостной смеси в ступени.

Ключевые слова: центробежный насос, ступень, течение газожидкостной смеси, математическая модель, модель турбулентности, напор, структурированная сетка.

The analysis of the features of the working process of a submersible electric centrifugal pump is carried out when pumping gas-liquid mixtures. Approaches to the modeling of gas-liquid flows are shown. The advantages of numerical experiments in front of field experiments are substantiated. Recommendations are given on the choice of the type of the grid and the choice of turbulence parameters, as well as the solver for calculating multiphase currents in the *OpenFOAM* program. Dependences of head losses, distribution of static pressure along the blade of the stage are obtained in the presence of gas in the pumped liquid. The flow of the gas-liquid mixture in the impeller is visualized. The theoretical and experimental statements on the structure of the flow of a multiphase fluid are visually confirmed. The coefficients for converting the pressure characteristic from water to a two-phase mixture are derived.

Keywords: centrifugal pump, stage, gas-liquid mixture flow, mathematical model, turbulence model, pressure, structured mesh.

Введение. Как правило, центробежные насосы предназначены для чистых жидкостей. Однако, эксплуатация погружных электроцентробежных насосов (ЭЦН) при добыче нефти из скважин показала, что часто насосам приходится перекачивать мультифазную – газожидкостную среду (ГЖС). Присутствие газа на входе в насос играет отрицательную роль, ухудшая напорную и энергетическую характеристики насоса. Но с другой стороны, газ, попавший в насосно-компрессорные трубы (НКТ), создает «газлифтный эффект», который способствует поднятию жидкости на дневную поверхность, уменьшая необходимый напор насоса. Обычно при высоком газовом факторе в нефтяной продукции скважин перед входом в ЭЦН устанавливают газосепаратор. Максимальную допустимую величину газосодержания на входе в насос рекомендуется принимать не более 25%. Математическое моделирование течений ГЖС в проточных каналах ЭЦН позволит прогнозировать гидравлические качества лопастных насосов на стадии проектирования и их действительные показатели при эксплуатации.

Обзор экспериментальных исследований газожидкостной среды в ЭЦН. Перекачке ГЖС посвящено множество исследований. Отметим наиболее фундаментальные исследования – работы Муравьева И. М., Мищенко И. Т., Ляпкина П. Д., Шарипова А. Г., Миннигазимова М. Г., Дроздова А. Н. Игровского В. И. [1–6]. Необходимо отметить экспериментальные исследования зарубежных авторов: Turpin J. L., Lea J. F., Bearden J. L., Dunbar C. E., Cirilo R. [7–9]. Анализ этих работ

показал, что попадание в насос свободного газа с откачиваемой жидкостью приводит к существенному деформированию напорной и энергетической характеристик насоса – уменьшению подачи жидкости, напора, КПД и к повышению мощности. Отрицательное влияние свободного газа особенно сказывается на подачах, меньших подачи оптимального режима. При наличии свободного газа в жидкости, в полостях рабочих колес и направляющих аппаратов образуются газовые каверны, не участвующие в потоке. Следствием этого уменьшается пропускная способность, нарушается энергообмен насоса с перекачиваемой средой, ухудшается процесс обтекания лопастей. В конечном итоге все эти факторы приводят к срыву подачи насоса.

Анализ экспериментальных работ [10] показал, что основными показателями, которые влияют на работу погружного центробежного насоса, является уровень газосодержания и давление на приеме насоса, а также водосодержание нефтяной продукции.

Проведение физических экспериментов по исследованию гидродинамической структуры одно- и двухфазного потоков в межлопаточных каналах вращающегося рабочего колеса ЭЦН всегда было сопряжено со сложностью осуществления визуализации и замера изучаемых параметров. Если вопросы визуализации картины течения в межлопаточных каналах импеллера в последнее время технически решались путем выполнения стенок ступени насоса из прозрачного материала и фиксации картины течения с помощью скоростной съемки [11], то проблема замера давлений и скоростей в

проточных каналах импеллера на сегодняшний день затруднена. Поэтому доступным способом исследования параметров течения в рабочем колесе ЭЦН является проведение численного (расчетного) эксперимента.

Обзор современных методов численного моделирования потока ГЖС в ЭЦН. Современное развитие гидродинамического моделирования движения жидкости и газа в проточных каналах гидромашин позволяет проводить более качественное исследование влияния ГЖС на работу ЭЦН.

Поток ГЖС в проточной части ступени ЭЦН имеет сложную структуру, поэтому его точное численное моделирование выполнить затруднительно. Выделим два основных подхода математического моделирования ГЖС в ЭЦН.

Первый подход – механистическое моделирование, основанное на решении одномерных, стационарных дифференциальных уравнений сохранения, замкнутых эмпирическими корреляциями. Наиболее известные работы – Sachdeva R. [12], Minemura K. [13], Sun D. [14] (2001), Михайлова В. Г. и Петрова П. В. [15]. Одним из основных ограничений этой математической модели (ММ) является допущение, что траектории движения газа совпадают с линиями тока жидкости – основные уравнения ММ записаны вдоль линии тока. Предложено, что линии тока совпадают с линией лопастей. Градиенты давлений от трения фаз о стенки, определяются по законам гидравлики – коэффициентами гидравлического трения. Силы трения между фазами рассматриваются для пузырькового режима течения. Учитываются ударные потери давления для ГЖС. В работах используются полуэмпирические зависимости, полученные в ходе экспериментальных исследований в университете г. Тулса (США, штат Оклахома). В последнее время модель усовершенствована для расчетов нестационарных режимов.

Второй подход – численное моделирование трехмерного турбулентного течения многофазной среды в расчетной области. В зависимости от подхода к моделированию модели многофазных течений разделяются на два основных класса: модели Лагранжа и Эйлера. В основе подхода Лагранжа лежит рассмотрение движение отдельных частиц (или групп частиц) вторичной дисперсной фазы. В основе подхода Эйлера лежит рассмотрение изменений параметров течения (скоростей, давлений) в точках пространства. Для многофазных течений при этом вводится понятие объемной доли фазы – еще одного дополнительного параметра течения. Подход Эйлера представлен моделями *VOF* (*Volume of Fluid* – метод объема жидкости), *Mixture* (модель многофазной смеси) и *Eulerian* (полная модель Эйлера).

В работах [16,17] представлены результаты численного моделирования уравнений гидродинамики 2-х фазного потока в подходе Эйлера с помощью современных программных продуктов.

В заключении следует отметить, что в связи ростом вычислительной мощности компьютеров и

развитием программных продуктов вычислительной гидродинамики (*CFD*), как лицензионных (например *ANSYS CFX*, так и с открытой интегрируемой платформой для численного моделирования задач механики сплошных сред (например, *OpenFOAM*), проведение численного эксперимента двухфазного потока в каналах ЭЦН, анализа структуры для разных режимов работы насоса, являются актуальным направлением работ.

Постановка задачи. Проведем численное моделирование турбулентного движения вязкого газожидкостного потока в ступени насоса ЭЦНД5-80 (рис. 1). Выполним исследование структуры 2-х фазного потока на расчетном $Q_{\text{опт}}$ и нерасчетных режимах ($0,75 Q_{\text{опт}}$, $1,25 Q_{\text{опт}}$) для двух значений объемной доли газа (газосодержания) на входе в насос β_g : 3 % и 10 %. Определим зависимости изменения напора отдельно в импеллере и в ступени в целом от газосодержания.

Физические свойства жидкости и газа в процессе расчета не изменяются. Влияние температуры не учитывается.

Для выполнения численного эксперимента с помощью современных программных продуктов, необходимо обосновать выбор математической модели, расчетной сетки, параметров турбулентности, граничных условий, а также решателя для расчетов мультифазных течений в программе *OpenFOAM*.

Математическая модель. Для проведения численного исследования была выбрана ММ турбулентного течения двухфазного потока вода-газ в постановке Эйлера. Фазы рассматриваются как взаимопроникающие среды: непрерывная жидкая фаза и дисперсная газовая фаза. Движение вещества каждой из фаз моделируется собственной системой уравнений движения и неразрывности, осредненных по времени (по Рейнольдсу). Согласно этой модели, уравнения записаны для каждой фазы и решаются совместно. Давление считается одним и тем же для каждой фазы. Фазы связаны между собой межфазной передачей импульса.

Ниже представлена система уравнений сохранения массы и импульса для стационарного течения 2-х фазной среды ($f = l, g$) в декартовой системе координат, вращающейся с угловой скоростью ω вокруг оси, проходящей через ее начало.

Уравнение неразрывности для каждой фазы:

$$\nabla(\beta_f \rho_f \vec{u}_f) = 0 \quad (1)$$

где ∇ – оператор Набла; β_f – объемная доля; ρ_f – плотность; u_f – вектор скорости фазы. Кроме того, объемные доли фаз должны удовлетворять соотношению:

$$\sum_f \beta_f = 1. \quad (2)$$

Уравнение импульса для непрерывной жидкой фазы:

$$\nabla(\beta_l \rho_l \vec{u}_l) = -\beta_l \nabla p + \nabla(\beta_l (\tau_l + \tau_l^T)) + \vec{F}_{D, l, g}, \quad (3)$$

для дисперсной фазы газа:

$$\nabla(\beta_g \rho_g \vec{u}_g \vec{u}_g) = -\beta_g \nabla p + \nabla(\beta_g (\tau_g + \tau_g^T)) + \vec{F}_{\omega g} - \vec{F}_{D l, g}, \quad (4)$$

где τ_f, τ_f^T – молекулярные и турбулентные (пульсационные) составляющие тензора напряжения для каждой фазы; p – давление (считается общими для обеих фаз); $\vec{F}_{\omega g}$ – массовая удельная сила, учитывающая вращение импеллера; $\vec{F}_{D l, g}$ – передача межфазного импульса фаз на единицу объема.

Течение во вращающемся рабочем колесе центробежного насоса рассматривается в относительной системе отсчета, при этом слагаемое \vec{F}_{ω} в правой части уравнений импульса выражает действие центробежных и кориолисовых сил:

$$\vec{F}_{\omega} = -\rho_i (2\vec{\omega} \times \vec{u} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})), \quad (5)$$

где $\vec{\omega}$ – угловая скорость вращения, \vec{r} – радиус-вектор (модуль которого равен расстоянию от данной точки до оси вращения).

Турбулентность течения для непрерывной жидкой фазы моделируется на основе SST модели [18, 19]. Для учета взаимодействия двух фаз в турбулентном потоке используются дополнительные слагаемые. Турбулентность второй фазы вычисляется с использованием полуэмпирической модели. Расчетные формулы и их обоснование представлены в работах [20, 21].

Силы сопротивления между газом и жидкой фазой (межфазная передача импульса) представляется уравнениями:

$$\vec{F}_{D l, g} = C_{D l, g} \frac{3}{4} \rho_l \frac{\beta_g}{d_b} |\vec{u}_g - \vec{u}_l| (\vec{u}_g - \vec{u}_l), \quad (6)$$

где C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления, оказываемое газовой фазой на жидкую фазу [17, 21].

Численная реализация ММ. В работах [22, 23] представлены и проанализированы основные принципы и возможности работы с открытым пакетом *OpenFOAM* для моделирования турбулентного течения вязкой жидкости в каналах гидромашин. Сопоставлены решения тестовой задачи турбулентного течения вязкой жидкости в канале ступени ЭЦН с экспериментальными данными.

Опишем кратко основные этапы моделирования рассматриваемой задачи в пакете *OpenFOAM*.

1. Построение 3D модели расчетной схемы межлопаточного канала импеллера и направляющего аппарата центробежного насоса. В дальнейшем она экспортирована в формат «*parasolid*» для построения расчетной сетки в генераторе *ICEM CFD*.

2. Заполнение расчетной области графической трехмерной схемы ячейками расчетной сетки в пакете *ICEM CFD Student Version*.

3. Импорт сетки с помощью команды «*fluent3DMeshToFoam*».

4. Задание граничных условий (препроцессор).

5. Запуск решателя. При моделировании течения газожидкостной смеси в рабочем колесе насоса используется решатель *MRF Multiphase InterFoam*.

6. Определение искомых величин, наглядная визуализация полей расчетных параметров (постпроцессор).

На рис. 1 представлен эскиз ступени погружного насос ЭЦНД5-80.

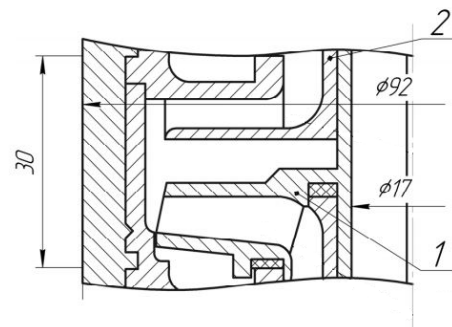


Рис. 1 – Ступень ЭЦНД:

1 – рабочее колесо; 2 – направляющий аппарат

Особенности построения расчетной сетки. В работах [24, 25] указывается, что для исследования трехмерного течения жидкости в проточных частях гидромашин для удобства и экономии времени строилась неструктурированная расчетная сетка с тетраэдральными ячейками. В данной работе проведены сравнительные расчеты двух типов сетки: неструктурированной и структурированной для межлопаточного канала ЭЦН. Результаты расчета показали, что структурированная сетка (рис. 2) с ячейками гексагональной формы дает более достоверную картину течения. Она имеет ряд преимуществ, таких как меньшее количество ячеек, ориентацию по линиям тока, лучшее качество. В дальнейших расчетах применялась эта сетка.

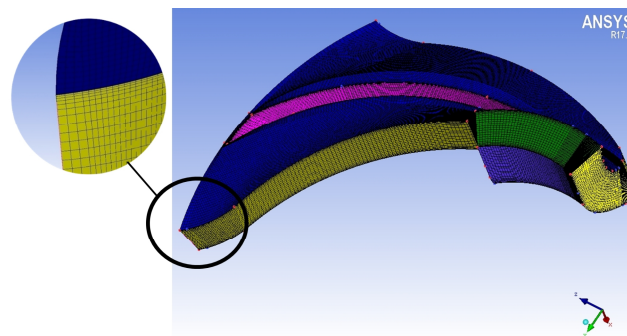


Рис. 2 – Расчетная сетка исследуемой области

Граничные условия: В качестве граничных условий на входе задавалась общая скорость смеси, которая определяется как $V = (Q_g + Q_l) / F$, а также объемная доли каждой фазы (в работе рассматривалось 3 % и 10 % газа от объема всей смеси). На выходе величина давления равная нулю.

Анализ результатов моделирования. На рис. 3 а, б представлено существенное изменение распределения фазы объемной доли воздуха по каналу

рабочего колеса при увеличении газосодержания от 3 % до 10 % при постоянном расходе.

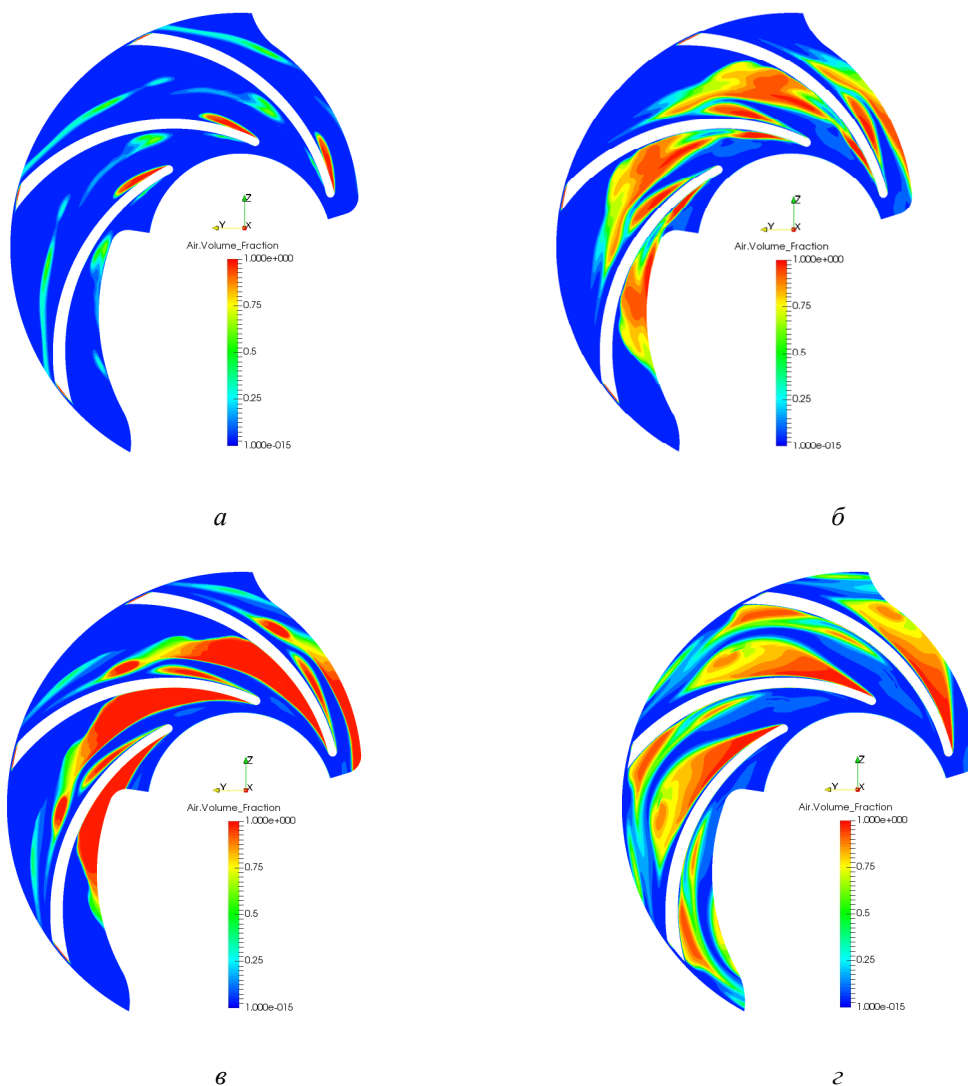


Рис. 3 – Распределение объемной доли воздуха во вращающемся импеллере:
 а – $Q_{опт}$, $\beta_g = 3\%$; б – $Q_{опт}$, $\beta_g = 10\%$; в – Q_{min} , $\beta_g = 10\%$; г – Q_{max} , $\beta_g = 10\%$

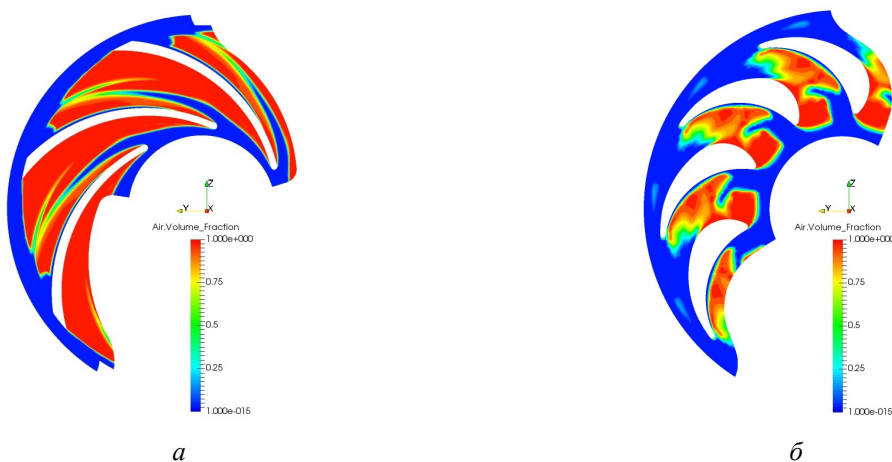


Рис. 4 – Распределение объемной доли воздуха в ступени ЭЦНД5-80 при Q_{max} , $\beta_g = 10\%$:
 а – рабочее колесо; б – направляющий аппарат

На рис. 3, в, г показано, что при увеличении расхода от $Q_{min} = 60 \text{ м}^3/\text{сут}$ до $Q_{max} = 100 \text{ м}^3/\text{сут}$ (газосодержание на входе принято 10 %) воздушный

«мешок» в канале смещается от входной зоны к выходной кромке импеллера. Вероятность срыва потока больше при малых значениях расхода.

Сравнение визуализации потоков в канале импеллера, полученных расчетным путем и экспериментально [1, 4, 11], показывает качественное сходжение. Следует отметить, что в опубликованных работах [11, 16] численное моделирование ГЖС проводилось с учетом направляющего аппарата.

Результаты расчета течения в ступени ЭЦН.

Дальнейшие численные исследования проведены для всего канала ступени: «рабочее колесо (РК) – направляющий аппарат (НА)». Известно, что основная функция НА в ступени – отвод потока от РК и подвод его к рабочему колесу следующей ступени. НА формирует структуру потока в рабочем колесе ступени. Влияние НА на структуру потока в РК можно увидеть, сравнивая распределения объемной доли воздуха в РК (импеллере), представленные на рис. 3, в и рис. 4 а. Из-за снижения давления в проточной части НА, в межлопаточных каналах мелкие пузырьки газа формируются в газовые каверны, которые препятствуют прохождению откачиваемой жидкости. При больших значениях газосодержания на входе в насос это может привести к срыву подачи (рис. 4, б) или существенному снижению напора и КПД насоса, увеличению потребляемой мощности.

На рис. 5 представлены графики распределения статического давления вдоль лопасти для трех значений газосодержания на входе в импеллер: $\beta_g = 0$; 3 % и 10 %. При увеличении газосодержания на входе в импеллер, разность давления между входной и выходной кромками рабочего колеса уменьшается из-за наличия газовых каверн в межлопаточных каналах.

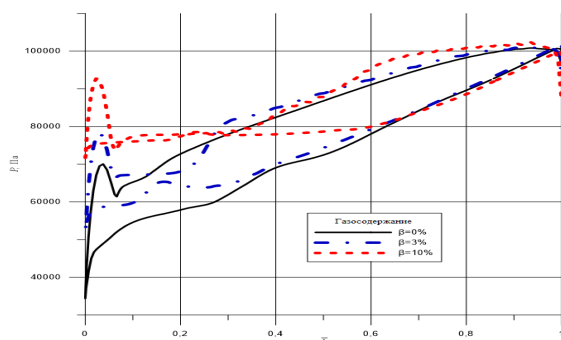


Рис. 5 – Распределение статического давления вдоль лопасти рабочего колеса

На рис. 6 представлены зависимости коэффициента снижения напора $K_H = H_{см} / H_v$ от величины газосодержания на входе в насос для трех значений расхода.

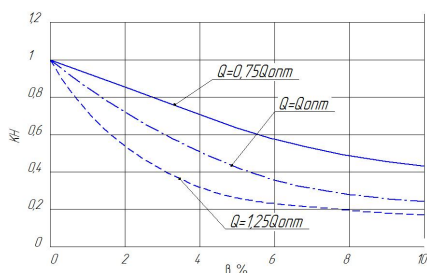


Рис. 6 – Графики зависимости коэффициента снижения напора от газосодержания на входе для ступени

Выводы. Анализ результатов, полученных при проведении численных расчетов пространственного вязкого течения газожидкостной смеси в ступени ЭЦН по программе *CFD*, наглядно показывает генерирование газовых каверн во вращающихся межлопаточных каналах РК. Следует отметить, что при проведении численного эксперимента при тении мультифазной смеси ЭЦН необходимо рассматривать только полную ступень, состоящую из импеллера и направляющего аппарата, так как последний имеет существенное влияние на структуру потока в РК. В дальнейших работах планируется учитывать влияние переменных условий эксплуатации (вязкость флюида, его обводненность, газосодержание, структуру потока) на энергетические показатели ступени.

Анализ экспериментальных исследований влияния газосодержания на работу ЭЦН показал, что общий характер изменения относительных параметров насосов близкой быстротходности одинаков. Снижение относительных параметров насосов практически не зависит от режима их работы [1].

Известно, что погружной электроцентробежный насос представляет собой уникальную конструкцию многоступенчатого центробежного насоса. Из-за ограничения габаритных диаметральных размеров скважины, напор одной ступени насоса составляет – 4–6 м. Поэтому для обеспечения требуемого напора (давления), количество ступеней ЭЦН достигает в среднем 100–500 единиц. Также известно, что по мере увеличения давления вдоль насоса (от ступени к ступени) уменьшается содержание свободного газа в продукции за счет его растворения в нефти и воде. Поэтому зависимости, представленные на рис. 6, можно использовать для расчета полной характеристики многоступенчатого насоса при перекачке ГЖС.

Список литературы

1. Муравьев И. М. Эксплуатация погружных центробежных электронасосов в вязких жидкостях и газожидкостных смесях. / И. М. Муравьев., И. Т. Мищенко – М.: Недра, 1969. 248с.
2. Мищенко И. Т. Скважинная добыча нефти. / И. Т. Мищенко – М.: Нефть и газ, 2007. 826с.
3. Ляков П. Д. Подбор установки погружного центробежного насоса к скважине. Учебное пособие / П. Д. Ляков – М.: МИНГ, 1987. – 71 с.
4. Минигазимов М. Г. Исследование влияния газа на работу погружного центробежного насоса ЭЦН5-80-800. / М. Г. Минигазимов, М. Г. Шарипов // Нефтепромысловое дело. – 1968. – №7, – С. 34-38.
5. Игrevский Л. В. Экспериментальные исследования влияния свободного газа на характеристики многоступенчатых погружных центробежных и центробежно-вихревых насосов. / Л. В. Игrevский, Е. М. Макаров // Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа. – 2002. – №3. – С. 35-42.
6. Дроздов А. Н. Погружные лопастные насосы. Исследования характеристик на газожидкостных смесях / А. Н. Дроздов // Нефтегазовая Вертикаль. – 2011. – №11. – С. 73-77.
7. Turpin J. L. Correlation of performance data for electric submersible pumps with gas-liquid flow / J. L. Turpin, J. F. Lea and J. L. Bearden // Proc. 33rd Southwestern Petroleum Short Course. – Lubbock, Texas, 1986. – P. 267-281.
8. Dunbar C. E. Determination of proper type of gas separator / C. E. Dunbar // Microcomputer Applications in Artificial Lift Workshop – SPE Los Angeles Basin Section, Oct. 15-17, 1989.

9. Cirilio R. Gas-Liquid Flow through Electric Submersible Pumps / R. Cirilio // SPE Gulf Coast Section – ESP Workshop. – Tulsa University, 1999. – P. 1–8.
10. Ageev III. P. Российские установки лопастных насосов для добычи нефти и их применение. Энциклопедический справочник. / III. P. Ageev, E. E. Grigoryan, Makienko G. P. – Пермь: ООО «Пресс-Мастер». – 2007. – 645с.
11. Литвиненко К. В. Прогнозирование технического состояния УЭЦН в условиях интенсивного выноса мехпримесей : дисс. кан-та техн наук : 05.02.13 / К. В. Литвиненко; Уфимский Государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2016. – 257 с.
12. Sachdeva R. Performance of Electric Submersible Pumps in Gassy Wells of Electric Submersible Pumps in Gassy Wells / R. Sachdeva, D. Doty, Z. Smidt // SPE Production and Facilities. – 1994. – P. 55–60.
13. Minemura K. "Effects of Entrained Air on the Performance of a Centrifugal Pump" / K. Minemura, M. Murakami // Bulletin of the JSME. – 1974. – № 110, Vol. 17. – P. 1047–1055.
14. Sun D. Modeling Gas-Liquid Head Performance of Electrical Submersible Pumps. Ph. D. Dissertation / D. Sun. Oklahoma The University of Tulsa, 2003.
15. Михайлов В. Г. Гидродинамическая модель течения газожидкостной смеси в проточных каналах центробежного насоса / В. Г. Михайлов, П. В. Петров // Вестник УГАТУ. Машиностроение. Гидравлические машины, гидропневоагрегаты. – Уфа: УГАТУ, 2008. Т. 10, №1 (26). С. 44–53
16. Muller T. Numerical 3D RANS simulation of gas-liquid flow in a centrifugal pump with an Euler-Euler two-phase model and a dispersed phase distribution / T. Muller, P. Limbach, R. Skoda // Proceedings of 11th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC11, March 23-27, 2015, Madrid, Spain.
17. Ахметов Ю. М. Численное моделирование течения газожидкостного потока в вихревой трубе. / Ю. М. Ахметов А. А. Сольвьев и др. // Вестник УГАТУ. Машиностроение. Гидравлические машины, гидропневоагрегаты. – Уфа: 2010. Т.14, №14(36). С. 32–39.
18. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications / F. R. Menter // AIAA J. – 1994. – 32, №8. – P. 1598–1605.
19. Гарбарук А. В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: Учебн. пособие // А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец. – СПб: Политехн. ун-т, 2012. – 88 с.
20. Kataoka I. Basic equations of turbulence in gas-liquid twophase flow / I. Kataoka I., A. Serizawa // Int. J. Multiphase Flow, - 1989. - Vol. 15, 843 p.
21. Sakr I. M. Computations of Upward Water/Air Fluid Flow in Vertical Pipes / I. M. Sakr, W. A. El-Askary // CFD Lettrs. Vol. 4(4). – 2012 P. 193–200.
22. Shudryk A. L. Using Open SOFTWARE Application Packages for of viscous incompressible fluid / A. L. Shudryk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 20(1192). – С. 53–57.
23. Christopher J. Greenshields. OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox. User Guide.
24. Шевченко Н. Г. Особенности численного моделирования течения вязкой жидкости в каналах погружных лопастных насосов низкой и средней быстроходности / Н. Г. Шевченко, А. Л. Шудрик, Л. Р. Радченко // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 45. – С. 76–81.
25. Drankovskiy V. E. Calculating three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode / V. E. Drankovskiy, K. S. Rezvaya, E. S. Krupa // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 20(1192). – С. 53–57.
3. Liapkov, P. D. *Podbor ustanovki pogruzhnogo tsentrobezhnogo nasosa k skvazhine. Uchebnoe posobie.* Moscow: MING, 1987. Print.
4. Minigazimov, M. G. and M. G. Shripov "Issledovanie vliyaniya gaza na rabotu pogruzhnogo tsentrobezhnogo nasosa ETsN5-80-800". *Neftepromyislovoe delo.* No. 7, 1968. 34–38. Print.
5. Igevskiy, L. V. and E. M. Makarov "Eksperimentalnyie issledovaniya vliyaniya svobodnogo gaza na harakteristiki mnogostupenchatykh pogruzhnykh tsentrobezhnykh i tsentrobezhno-vihrevykh nasosov." *Nadezhnost i sertifikatsiya oborudovaniya dlya nefiti i gaza.* No. 3, 2002. 35–42. Print.
6. Drozdov, A. N. "Pogruzhnyie lopastnyie nasosyi. Issledovaniya harakteristik na gazozhidkostnykh smesyakh." *Neftegazovaya Vertikal.* No. 11, 2011. 73–77. Print.
7. Turpin, J. L., J. F. Lea and J. L. Bearden "Correlation of performance data for electric submersible pumps with gas-liquid flow." *Proc. 33rd Southwestern Petroleum Short Course. Lubbock, Texas.* 1986. 267–281. Print.
8. Dunbar, C. E. "Determination of proper type of gas separator" Microcomputer Applications in Artificial Lift Workshop – SPE Los Angeles Basin Section. Oct. 15-17, 1989.
9. Cirilio, R. "Gas-Liquid Flow through Electric Submersible Pumps" *SPE Gulf Coast Section – ESP Workshop.* – Tulsa University. 1999. – P. 1–8.
10. Ageev, Sh. R., E. E. Grigoryan and G. P. Makienko. *Rossiyskie ustanovki lopastnykh nasosov dlya dobychi nefiti i ikh primeneniye. Entsiklopedicheskiy spravochnik.* Perm': ООО «Press-Master». – 2007. Print.
11. Litvinenko K. V. *Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya UETsN v usloviyakh intensivnogo vynosa mekhprimesey. Diss. kanta tehn. nauk.* Ufa, 2016. Print.
12. Sachdeva, R., D. Doty and Z. Smidt "Performance of Electric Submersible Pumps in Gassy Wells of Electric Submersible Pumps in Gassy Wells." *SPE Production and Facilities*, 1994. 55–60. Print.
13. Minemura, K. and M. Murakami "Effects of Entrained Air on the Performance of a Centrifugal Pump." *Bulletin of the JSME.* No. 17, 1974. 1047–1055. Print.
14. Sun, D. *Modeling Gas-Liquid Head Performance of Electrical Submersible Pumps. Ph. D. Dissertation.* Oklahoma, 2003. Print.
15. Mikhaylov, V. G. and P. V. Petrov "Gidrodinamicheskaya model' techeniya gazozhidkostnoy smesi v protochnykh kanalakh tsentrobezhnogo nasosa" *Vestnik UGATU. Mashinostroyeniye. Gidravlicheskie mashyny, gidropnevoagregaty.* No. 1(26), Vol. 10. Ufa UGATU, 2008. 44–53. Print.
16. Muller, T., P. Limbach and R. Skoda "Numerical 3D RANS simulation of gas-liquid flow in a centrifugal pump with an Euler-Euler two-phase model and a dispersed phase distribution" *Proceedings of 11th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC*, March 2015, Madrid, Spain. 23–27. Print.
17. Akhmetov, Yu. M., A. A. Soloviyev and others. "Chislennoe modelirovanie techeniya gazozhidkostnogo potoka v vikhrevoiy trube." / *Vestnik UGATU. Mashinostroyeniye. Gidravlicheskie mashyny, gidropnevoagregaty.* No. 14(36), Vol. 14. Ufa UGATU, 2010. 32–39. Print.
18. Menter, F. R. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications." *AIAA J.* 1994. No. 8, Vol. 32. 1598–1605. Print.
19. Garbaruk, A. V. and M. Kh. Strelets. *Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy: Uchebn. Posobie.* SPb: Politekhn. un-t, 2012. Print.
20. Kataoka, I. and A. Serizawa "Basic equations of turbulence in gas-liquid twophase flow". *Int. J. Multiphase Flow.* 1989. Vol. 15. Print.
21. Sakr, I. M. and W. A. El-Askary "Computations of Upward Water/Air Fluid Flow in Vertical Pipes" / *CFD Lettrs*, 2012. Vol. 4(4). Print.
22. Shudryk, A. L. "Using Open Software Application Packages for of viscous incompressible fluid" *Visnyk NTU "HPI". Ser.: Gidravlichni mashini ta gidroagregati.* No. 20(1192). Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. 53–57. Print.
23. Christopher, J. Greenshields. *OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox. User Guide.* Web. 21 January 2016 <www.openfoam.com>.
24. Shevchenko, N. G., A. L. Shudrik and L. R. Radchenko "Osobennosti chislennoho modelirovaniya techeniya вязкой жидкости в каналах погружных лопастных насосов низкой и средней быстроходности." *Buletin of NTU "KhPI". Ser.: Hydraulic*

References (transliterated)

1. Muraviyov, I. M. and I. T. Mishchenko *Ekspluatatsiya pogruzhnykh tsentrobezhnykh elektronasosov v вязких жидкостях i gazozhidkostnykh smesyakh.* Moscow: Nedra, 1969. Print.
2. Mishchenko, I. T. *Skvazhinnaya dobyicha nefiti.* Moscow: Neft' i gaz, 2007. Print.

- machines and hydrounits*. No. 45. Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. Print.
25. Drankovskiy, V. E., K. S. Rezvaya and E. S. Krupa "Calculating three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode." *Buletin of NTU "KhPI". Ser.:*

Hydraulic machines and hydrounits. No. 20(1192). Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. 53–57. Print.

Поступила (received) 05.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Исследование течения газожидкостной смеси в проточной части ступени погружного насоса для добычи нефти / Н. Г. Шевченко, О. Л. Шудрик, Е. Ю. Бондаренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 22 (1244). – С. 31–37. – Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2411-3441.

Исследование течения газожидкостной смеси в проточной части ступени погружного насоса для добычи нефти / Н. Г. Шевченко, О. Л. Шудрик, Е. Ю. Бондаренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 22 (1244). – С. 31–37. – Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2411-3441.

Investigation of the flow of gas-liquid mixture in the flow part of the stage of the submersible pump for oil production / N. G. Shevchenko, O. L. Shudryk, O. Yu. Bondarenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 22 (1244). – P. 31–37. – Bibliogr.: 25. – ISSN 2411-3441.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шевченко Наталія Григорівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (095) 425-18-33; e-mail: shevng@ukr.net.

Шевченко Наталья Григорьевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Гидравлические машины»; тел.: (095) 425-18-33; e-mail: shevng@ukr.net.

Shevchenko Nataliya Grygorivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Hydraulic machines"; tel.: (095) 425-18-33; e-mail: shevng@ukr.net.

Шудрик Олександр Леонідович – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (099) 37-07-660; e-mail: shudral88@gmail.com.

Шудрик Александр Леонидович – аспирант, «Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры «Гидравлический машины»; тел.: (099) 37-07-660; e-mail: shudral88@gmail.com.

Shudryk Oleksandr Leonidovych – postgraduate, National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant at the Department "Hydraulic machines"; tel.: (099) 37-07-660; e-mail: shudral88@gmail.com.

Бондаренко Олена Юрійвна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», інженер кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (066) 521-60-15; e-mail: shudral93@gmail.com.

Бондаренко Елена Юрьевна – «Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», инженер кафедры «Гидравлический машины»; тел.: (066) 521-60-15; e-mail: shudral93@gmail.com.

Bondarenko Olena Yuriyivna – National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute", engineer at the Department "Hydraulic machines"; tel.: (066) 521-60-15; e-mail: shudral93@gmail.com.