

МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИФАЗНЫХ ПОТОКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИННЫХ НАСОСОВ

А.А. Синицына

sin.anastasia23@gmail.com

SPIN-код: 7794-2264

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность проблемы, рассматриваемой в статье, обусловлена необходимостью создания альтернативных методов испытания оборудования, работающего на газожидкостной смеси. Рассмотрены различные способы испытания оборудования на газожидкостной смеси. Традиционные методы испытания оборудования (стендовые испытания) требуют значительных финансовых и временных затрат, в то время как методы гидродинамического моделирования позволяют провести испытания без изготовления натурной модели, и как следствие, получают все большее распространение. Приведено описание метода гидродинамического моделирования при испытаниях оборудования на газожидкостной смеси. Приведено краткое описание математической модели VOF (Volume of fluid) для гидродинамического моделирования мультифазных потоков. Приведен пример расчета параметров работы ступени нефтяного многоступенчатого электроцентробежного насоса в программном комплексе STAR CCM+ Результаты исследования могут быть применимы при проектировании, оптимизации и расчете параметров работы оборудования, работающего на газожидкостной смеси.

Ключевые слова

Методы численного моделирования, газожидкостная смесь, электроцентробежный насос, методы испытания, мультиспособы испытания оборудования на газожидкостной фазная смесь, нефтегазовое оборудование, проточная часть, математическое описание, точность расчетов

Поступила в редакцию 24.02.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. Согласно статистическим данным, в последние годы в России растет доля электроцентробежных нефтяных скважинных насосов (ЭЦН), перекачивающих нефть с повышенным содержанием природного газа. Появляется необходимость предсказывать поведение, параметры и ресурс работы электроцентробежного насоса. В связи с этим возникает спрос на создание универсального метода расчета и испытаний нефтяных скважинных насосов, работающих на мультифазной смеси нефти и природного газа.

Вопрос испытания оборудования на газожидкостной смеси (ГЖС) достаточно сложный. Существует два основных метода расчета параметров оборудования — натурный эксперимент и гидродинамическое моделирование [1–3]. Испытание оборудования на газожидкостной смеси в настоящее время в России

можно провести только в Российском государственном университете нефти и газа имени И.М. Губкина на испытательном стенде АО «Новомет». Однако данный метод испытаний достаточно сложный и требует значительных финансовых затрат — для проведения натуральных испытаний необходимо получить доступ к оборудованию и изготовить опытный образец; кроме того, нужно покрыть затраты на электроэнергию и др. В связи с этим все большее распространение получает второй метод расчета оборудования, работающего на газожидкостной смеси, — метод гидродинамического моделирования мультифазных потоков.

Метод гидродинамического моделирования при испытаниях оборудования на ГЖС. Специальные программы для гидродинамического моделирования позволяют проводить виртуальные испытания оборудования, а также различные исследования по работе оборудования на ГЖС, в том числе скважинных погружных насосов. Однако численных исследований работы насоса на ГЖС было проведено относительно немного. Это связано в первую очередь со спецификой таких расчетов — выбором моделей мультифазности, коэффициентов уравнений, сложностью подбора параметров расчета, т.е. с физико-математическим описанием движения мультифазных потоков. Так, авторы статьи [4] отмечают, что работу насоса на мультифазной смеси достаточно сложно предсказать, мультифазные потоки существенно влияют на поведение насоса так, что напорно-энергетические характеристики насоса меняют форму при содержании газа в ГЖС 7 % и более.

При моделировании течения ГЖС в моделях сложной формы (например, проточной части насосов), возникает основная сложность — задача физико-математического описания потока двухфазной жидкости, состоящая в необходимости описания нестационарных явлений тепло- и массопереноса, нестационарного движения двухфазных сред. Существуют различные подходы к математическому описанию двухфазных потоков.

Метод прямого численного моделирования DNS, созданный на основе математических моделей двухфазных потоков, получил широкое распространение в последнее время. Данный метод лежит в основе всех моделей для моделирования мультифазных течений во всех программных пакетах для гидродинамического моделирования — ANSYS, STAR CCM+, FlowVision и др. Существуют и другие модели, однако специалисты по гидродинамическим расчетам отмечают, что результаты, полученные с помощью метода DNS, дают сходящиеся решения и наиболее близкие к реальным испытаниям результаты.

Отметим, что в основе всех вышеперечисленных программ лежат очень схожие математические модели для математического моделирования мультифазных потоков, соответственно, точность и результаты расчетов в этих программах будут схожие.

Пример расчета параметров работы ступени ЭЦН в программном пакете STAR CCM+. Для примера расчета параметров ступени ЭЦН в программном комплексе CF Turbo была спроектирована и рассчитана ступень ЭЦН в габарите

6 (внешний диаметр корпусной трубы насоса равен 114 мм). Параметры расчета ступени приведены ниже:

Номинальная подача Q , м ³ /сут	400
Напор H , м	4,5
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	2900

Расчетная область представляет собой проточную часть ступени ЭЦН — рабочее колесо, лопаточный направляющий аппарат (АН). 3D-модель ступени была получена в программном пакете CF Turbo.

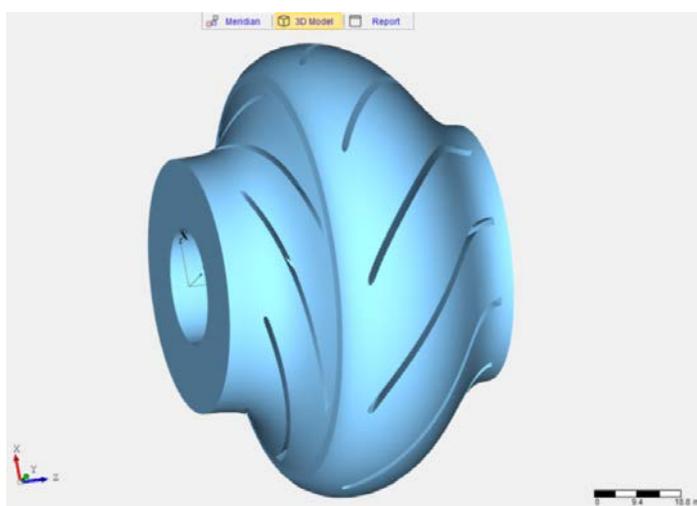


Рис. 1. Полученная в программном комплексе CF Turbo 3D-модель ступени

В программном пакете для 3D-моделирования Creo Parametric были построены выходной патрубков для стабилизации потока на выходе из направляющего аппарата и входной патрубков для задания начальных условий. Полученная расчетная модель представлена на рис. 2.

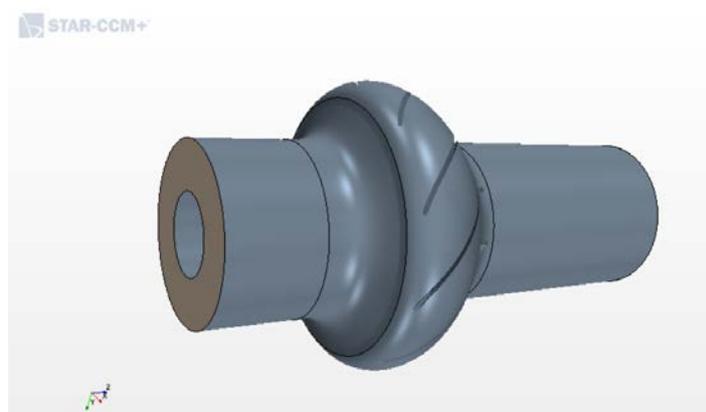


Рис. 2. Расчетная модель

Далее была построена сеточная модель и выбрана физические модели для моделирования течения двухфазных потоков в ступени.

По рекомендациям специалистов кафедры Э-10 «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика» при моделировании мультифазных потоков в проточной части ЭЦН использовалась двухфазная модель [5, 6], основанная на методе прямого численного моделирования DNS — VOF (Volume of fluid). В данной модели многофазная среда рассматривается как одиночная текучая среда, чьи свойства изменяются согласно объемной доле каждой из фаз:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V},$$

где V_i — объем каждой фазы; V — объем ячейки.

Отметим, что в связи с недостатком литературы на данную тему подбор дополнительных мультифазных моделей и коэффициентов, при которых решение сходилось и результаты расчета соответствовали законам физики, занял около 6 месяцев. Результаты расчета представлены ниже.

Сцена распределения объемного газосодержания в сечении ступени при 10 % газа в ГЖС в программном пакете STAR CCM+ приведена на рис. 3.

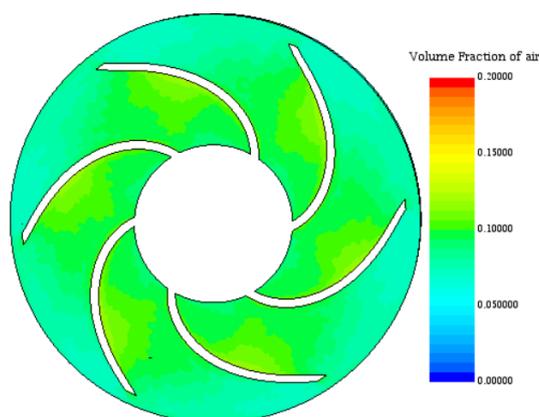


Рис. 3. Сцена распределения объемного газосодержания в сечении при 10 % газа на входе в ступень

На рис. 4 приведена сцена распределения ГЖС в сечении АН при 10 % газа на входе в ступень ЭЦН.

Отметим, что имеется ряд вопросов, связанных с точностью численных расчетов. В частности, в области мультифазных расчетов, выполненных в программном комплексе STAR CCM+, авторы статьи [7] отмечают, что результаты расчета одного и того же насоса, но с разными выбранными моделями мультифазности несколько отличаются. Следовательно, невозможно сделать вывод о 100%-ной достоверности полученных результатов и необходимо знать о применимости той или иной модели для данного расчета. Ситуация осложняется тем, что экспериментальных данных о расчетах работы ЭЦН или входных моду-

лей для ЭЦН на ГЖС крайне мало [8], так как единственный стенд для испытательного оборудования на ГЖС был спроектирован и собран относительно недавно.

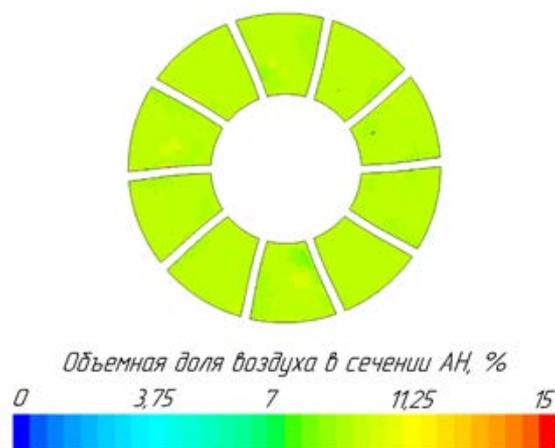


Рис. 4. Объемная доля в сечении АН при 10 % на входе в ступени ЭЦН

Подводя итог вышесказанному, отметим, что неточность расчетов скважинных насосов на ГЖС связана с недостатком опыта проведения таких расчетов и, как следствие, с недостатком статей и учебных пособий на русском и даже на английском языках о специфике проведения таких расчетов, включающих выбор физических моделей расчета, моделях мультифазности, построения сетки, выбора коэффициентов и т. д.

Выводы. В настоящее время область гидродинамических расчетов активно развивается — появляется все больше публикаций на эту тему, в которых полученные результаты численного моделирования сопоставляются с экспериментальными данными; описываются физические модели, применяемые в расчетах; приводится описание физического явления и его моделирование с помощью программных пакетов и т. д. Кроме этого, появляется все больше компаний, предлагающих услуги по проведению гидродинамических расчетов и обучению сотрудников, что говорит о росте интереса российских компаний к расчетам с помощью методов численного моделирования.

Очевидно, что CFD-методы позволяют инженеру значительно экономить время на расчет, оптимизацию параметров проточной части насоса, позволяя улучшить энергетические показатели насоса за максимально короткие сроки, а также существенно сократить финансовые затраты и уменьшить время на изготовление сложного тестового комплекса для испытаний.

Литература

- [1] Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. М., Нефть и газ, 2003.
- [2] Дроздов А.Н. Разработка, исследование и результаты промышленного использования погружных насосно-эжекторных систем для добычи нефти. Дисс. ... док. тех. наук. М., РГУ им. И.М. Губкина, 1998.

-
- [3] Дроздов А.Н. Технология и техника добычи нефти погружными насосами в осложненных условиях. М., МАКС пресс, 2008.
- [4] Si Q., Bois G., Zhang K. et al. Air-water two-phase experimental and numerical analysis in a centrifugal pump. *Proc. 12th ETC12*, paper ETC2017-054. DOI: <https://doi.org/10.29008/ETC2017-054>
- [5] Бояршинова А.М. Современные направления развития и методы моделирования мультифазных насосов. *Политехнический молодежный журнал*, 2018, № 6. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2018-6-326>
- [6] Сеницына А.А., Петров А.И. Исследование работы компрессионно-диспергирующей ступени методами гидродинамического моделирования. *Насосы. Турбины. Системы*, 2020, № 3, с. 6–14.
- [7] Saprykina M., Lomakin V. The evaluation of the effect of gas content on the characteristics of a centrifugal pump. *Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 589, art. 012017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/589/1/012017>
- [8] Дроздов А.Н. Исследования характеристик насосов при откачке газожидкостных смесей и применение полученных результатов для разработки технологий водогазового воздействия. *Нефтяное хозяйство*, 2011, № 9, с. 108–111.

Сеницына Анастасия Алексеевна — аспирантка кафедры «Гидравлика, гидромашин и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Петров Алексей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика, гидромашин и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сеницына А.А. Моделирование мультифазных потоков при разработке нефтяных скважинных насосов. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 03(68). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-03-781>

MODELLING MULTIPHASE FLOWS IN THE DEVELOPMENT OF OIL WELL PUMPS

A.A. Sinitsyna

sin.anastasia23@gmail.com

SPIN-code: 7794-2264

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The relevance of the problem considered in the article stems from the need to create alternative methods for testing equipment running on a gas-liquid mixture. Different methods of testing equipment on a gas-liquid mixture are considered. Traditional methods of equipment testing (bench tests) require significant financial and time costs, while hydrodynamic simulation methods allow testing without making a full-scale model and, as a consequence, are becoming more widespread. The hydrodynamic simulation method for testing equipment in the gas-liquid mixture is described. A brief description of the VOF (Volume of fluid) mathematical model for multiphase flows hydrodynamic simulation is provided. Calculation example of operating parameters of an oil multistage electric centrifugal pump stage in STAR CCM+ software package is presented. The results of the study can be applied to design, optimization and calculation of operating parameters of equipment running on a gas-liquid mixture.

Keywords

Numerical modelling methods, gas-liquid mixture, electric centrifugal pump, test methods, multiphase mixture, oil and gas equipment, flow part, mathematical description, calculation accuracy

Received 24.02.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Mishchenko I.T. Skvazhinnaya dobycha nefi [Borehole oil production]. Moscow, Neft' i gaz Publ., 2003 (in Russ.).
- [2] Drozdov A.N. Razrabotka, issledovanie i rezul'taty promyshlennogo ispol'zovaniya pogruzhnykh nasosno-ezhektornykh sistem dlya dobychi nefi. Diss. dok. tekhn. Nauk [Development, research and results of industrial application of submersible pumpset for oil production. Doc. tech. sci. diss.]. Moscow, RGU im. I.M. Gubkina Publ., 1998 (in Russ.).
- [3] Drozdov A.N. Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefi pogruzhnymi nasosami v oslozhnennykh usloviyakh [The technology and technique of oil production by submersible pumps in the complicated conditions]. Moscow, MAKS press Publ., 2008 (in Russ.).
- [4] Si Q., Bois G., Zhang K. et al. Air-water two-phase experimental and numerical analysis in a centrifugal pump. *Proc. 12th ETC12*, paper ETC2017-054. DOI: <https://doi.org/10.29008/ETC2017-054>
- [5] Boyarshinova A.M. Current trends of development and methods of modeling the multiphase pumps. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical Student Journal], 2018, no. 6. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2018-6-326> (in Russ.).
- [6] Sinitsyna A.A., Petrov A.I. Study of the operation of the compression and dispersing stage by CFD methods. *Nasosy. Turbiny. Sistemy* [Pumps. Turbines. Systems], 2020, no. 3, pp. 6–14 (in Russ.).

- [7] Saprykina M., Lomakin V. The evaluation of the effect of gas content on the characteristics of a centrifugal pump. *Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 589, art. 012017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/589/1/012017>
- [8] Drozdov A.N. Investigations of the submersible pumps characteristics when gas-liquid mixtures delivering and application of the results for swag technologies development. *Neftyanoe khozyaystvo* [Oil Industry], 2011, no. 9, pp. 108–111 (in Russ.).

Sinitsyna A.A. — Postgraduate Student, Department of Hydraulic Machines and Hydropneumodynamics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Academic advisor — Petrov A.I., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Hydraulic Machines and Hydropneumodynamics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Sinitsyna A.A. Modelling Multiphase Flows in the Development of Oil Well Pumps. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 03(68). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-03-781.html> (in Russ.).