DOI: 10.24411/2076-6785-2020-10106 УДК 622.276 + 621.65/621.69 | Научная статья

Стенд исследований дисперсности газовой фазы в потоке газожидкостной смеси по длине электроцентробежного насоса

Горидько К.А.
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия
goridko.ka@gubkin.ru

Аннотация
В работе представлена схема нового стенда для исследований характеристик погружного электроцентробежного насоса на газожидкостных смесях с учетом распределения давления и дисперсности газовой фазы по длине насоса, описана методика проведения экспериментальных исследований. Разработана оригинальная конструкция мотор-весов для измерения мощности на валу электроцентробежного насоса.

Материалы и методы
Физическое моделирование работы погружного электроцентробежного насоса на газожидкостных смесях, схема стенда и методика исследований.

Ключевые слова
газожидкостная смесь, погружной электроцентробежный насос, стенд

Благодарность
Автор выражает благодарность своему научному руководителю Вербицкому В.С. за помощь в проектировании и создании стенда, доценту кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений Игревскому Л.В. за помощь в проектировании электрической схемы и автоматизации стенда, а также аспиранту кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений Никонову Е.И. за помощь в проведении монтажных работ.

Для цитирования
Горидько К.А. Стенд исследований дисперсности газовой фазы в потоке газожидкостной смеси по длине электроцентробежного насоса // Экспозиция Нефть Газ. 2020. № 6. С. 62–66. DOI: 10.24411/2076-6785-2020-10106

Поступила в редакцию: 02.09.2020

OIL PRODUCTION UDC 622.276 + 621.65/621.69 | Original Paper

The bench for studying gas phase dispersion in gas-liquid mixture flow along the length of electric submersible pump

Goridko K.A.
Gubkin University, Petroleum Reservoir and Production Engineering Department, Moscow, Russia
goridko.ka@gubkin.ru

Abstract
The paper presents a scheme of a new bench to study the characteristics of electric submersible pump on gas-liquid mixtures, taking into account the distribution of pressure and gas phase dispersion along the pump length, describes the methods of experimental studies. The original design of the motor-weights for measuring the power on the electric submersible pump shaft is developed.

Materials and methods
Physical modelling of the electric submersible pump operation on gas-liquid mixtures, scheme of the bench and study procedures.

Keywords
gas-liquid mixture, electric submersible pump, bench

For citation
Goridko K.A. The bench for studying gas phase dispersion in gas-liquid mixture flow along the length of electric submersible pump. Exposition Oil Gas, 2020, issue 6, P. 62–66. (In Russ). DOI: 10.24411/2076-6785-2020-10106

Received: 02.09.2020

Введение
Эксплуатация скважин установками электроцентробежных насосов осложнена различными факторами, одним из них является наличие свободного газа в добываемой продукции. Как известно, характеристика погружного электроцентробежного насоса (ПЭЦН) подвергается вредному влиянию свободного газа, а именно одновременно снижаются подача насоса по жидкости, развиваемый напор и коэффициент полезного действия (КПД). Степень деформации характеристики ПЭЦН зависит от давления на входе в насос, доли свободного газа в добываемой продукции, поверхностного натяжения на границе фаз жидкости и газа, дисперсности газовой фазы в потоке, а также частоты вращения вала насоса.

Таким образом, перед инженерами стоит задача проектирования оптимального дизайна скважинного оборудования, с учетом деформации характеристики ПЭЦН и прогнозирования технологического режима работы скважины. Неправильный расчет ПЭЦН для скважины влечет за собой технологические и экономические потери.

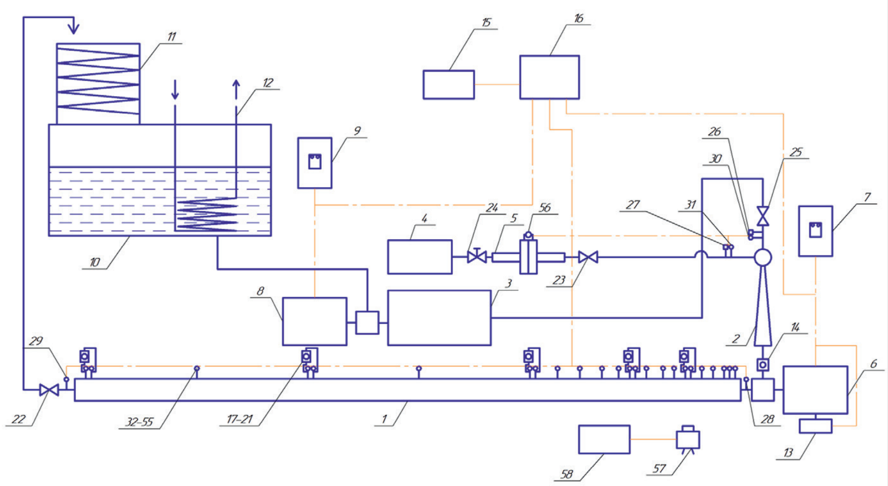
Для определения коэффициентов деформации характеристики ПЭЦН по напору и подаче различными исследователями используются два основных подхода: физическое и математическое моделирование.

Физическое моделирование — экспериментальное определение характеристики ПЭЦН на газожидкостной смеси (ГЖС), в большинстве случаев проводится на стендах, так как позволяет охватить более широкий диапазон работы насоса [1]. Но термобарические условия и перекачиваемая смесь отличаются от скважинных. Иногда исследования характеристик ПЭЦН проводятся в скважинных условиях, что позволяет соблюсти термобарические условия и PVT-свойства. Но такие эксперименты получаются в узком диапазоне, так как регулирование работы насоса, а также контроль граничных условий осложнены совместной работой системы: «пласт – скважина – насос» [2].

Математическое моделирование позволяет покрыть наиболее широкий диапазон условий работы насоса как по технологическим параметрам работы, так и по свойствам перекачиваемого флюида. Но при проведении математического моделирования — как для CFD-моделирования, так и для аналитических моделей — исследователям необходимы эмпирические зависимости, которые приближают результаты расчетов к действительности [3].

Для изучения параметров распределения давления и дисперсности газовых пузырьков в составе ГЖС по длине насоса определен подход физического моделирования процесса на экспериментальном стенде. Для этого на кафедре разработки и эксплуатации нефтяных месторождений спроектирован и создан стенд для исследования характеристик ПЭЦН на ГЖС с учетом замера давления и дисперсности газовой фазы по длине насоса. Также разработаны методика проведения исследований и методика обработки экспериментальных данных и проведены исследования в рамках диссертационной работы автора.

В этой статье представлена схема созданного стенда, методика проведения эксперимента и подход к определению КПД насоса.



1 — исследуемый ПЭЦН; 2 — ЖГЭ; 3 — подпорный насос; 4 — компрессор; 5 — реометрический стенд; 6, 8 — двигатель; 7, 9 — ЧП; 10 — бак; 11 — гравитационный полочный сепаратор; 12 — проточный теплообменник; 13 — мотор-весы; 14 — смотровой модуль; 15, 58 — компьютер; 16 — ПЛК; 17–21 — смотровые ячейки; 22, 23, 25 — задвижка; 24 — редуктор; 26, 27 — датчик температуры; 28 — датчик давления на входе в ПЭЦН; 29 — датчик давления на выходе из ПЭЦН; 30 — датчик давления жидкости перед соплом ЖГЭ; 31 — датчик давления пассивного потока газа на приеме ЖГЭ; 32–55 — датчики давления по длине ПЭЦН; 56 — дифференциальный манометр; 57 — высокоскоростная камера

1 – studied ESP; 2 – LGE; 3 – booster pump; 4 – compressor; 5 – rheometric stand; 6, 8 – motor; 7, 9 – variable frequency drive; 10 – tank; 11 – gravity shelf separator; 12 – flow heat exchanger; 13 – motor–weights; 14 – observation module; 15, 58 – computer; 16 – PLC; 17–21 – observation cells; 22, 23, 25 – valve; 24 – reducer; 26, 27 – temperature sensor; 28 – pressure sensor at the ESP intake; 29 – pressure sensor at the ESP outlet; 30 – liquid pressure sensor in front of the nozzle LGE; 31 – pressure sensor of the passive gas flow at the LGE intake; 32–55 – pressure sensors along the ESP length; 56 – differential pressure gauge; 57 – high-speed camera

Рис. 1. Схема стенда
Fig. 1. Scheme of the Bench

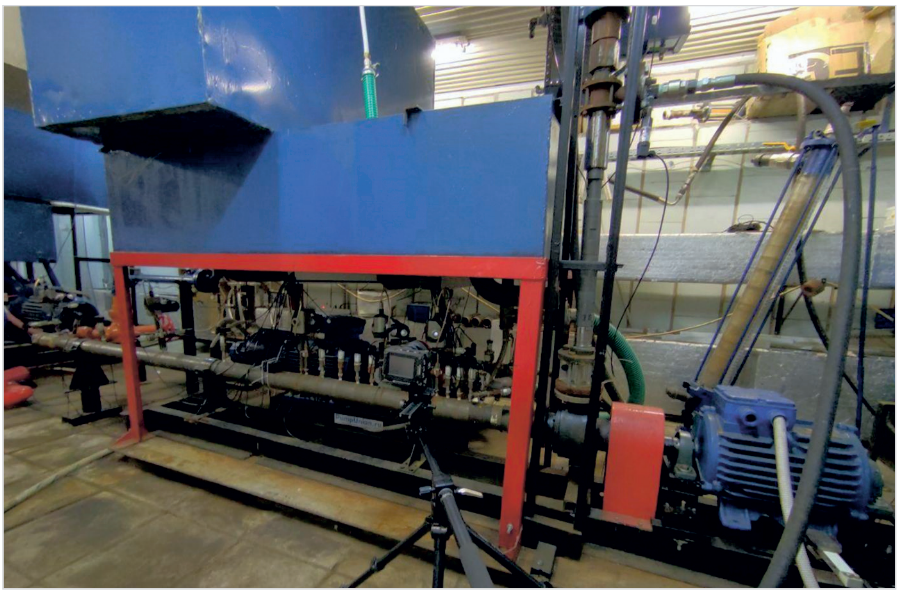


Рис. 2. Общий вид стенда
Fig. 2. General view of the Bench

Схема стенда

Разработанный стенд позволяет проводить исследования ПЭЦН на ГЖС при давлениях на входе в насос в интервале МПа, при частоте вращения вала в интервале f=30-60 Гц, в качестве модельных газожидкостных смесей могут выступать смеси «вода – воздух», «вода – ПАВ – воздух», «масло – воздух». Исследование характеристик на модельных ГЖС обусловлено требованиями техники безопасности и невозможностью проведения экспериментов на реальных углеводородных газах в лабораторных условиях. Однако такие исследования проводились на полупромышленных стендах [2].

Принципиальная схема созданного стенда для исследований характеристик ПЭЦН на ГЖС с учетом замера давления и дисперсности газовой фазы по длине насоса представлена на рисунке 1, фото стенда — на рисунке 2. Основными элементами стенда являются исследуемый насос ЭЦН5-50 (118 ступеней радиального типа), жидкостно-газовый эжектор (ЖГЭ), подпорный насос, компрессор, система подачи воды и газа, задвижки, высокоскоростная камера, а также система контрольно-измерительных приборов и автоматики.

Для анализа распределения давления и дисперсности по длине насоса в корпусе насоса и рабочих ступенях просверлены отверстия под штуцера, к которым присоединяются датчики давления и смотровые ячейки. Датчики давления установлены по логарифмическому закону на {1, 2, 3, 5, 7, 9, 10, 12, 14, 17, 19, 20, 22, 25, 29, 33, 37, 38, 58, 77, 78, 98, 117, 118} ступенях для исследования кривых распределения давления по длине насоса при откачке ГЖС (рис. 3). Ближе к входу насоса датчики установлены более плотно, так как первые ступени наиболее сильно подвержены вредному влиянию свободного газа в перекачиваемой ГЖС. Пары ступеней — {9, 10}, {19, 20}, {37, 38}, {77, 78}, {117, 118} — соединены между собой через смотровые окошки для замера дисперсности газовой фазы, то есть диаметров газовых пузырьков, которые движутся внутри насоса. На входе в насос установлен проточный смотровой модуль для контроля дисперсности.

Методика проведения эксперимента

Предварительно устанавливается ЖГЭ с определенной конфигурацией проточной части: диаметр сопла D_c = {2.0, 2.3, 2.6, 2.9, 3.2, 3.5, 3.8, 4.1, 4.7} мм, диаметр камеры смешения = {4.5, 7.1} мм. Пять сопел с наименьшим диаметром D_c = {2.0, 2.3, 2.6, 2.9, 3.2} мм комплектуются с камерой смешения диаметром = 4.5 мм, длиной камерой смешения = 167 мм; остальные сопла D_c = {3.5, 3.8, 4.1, 4.7} мм устанавливаются вместе с камерой смешения диаметром = 7.1 мм, длиной камерой смешения = 340 мм. Выбор удлиненных камер смешения струйного аппарата обусловлен следующими причинами. Согласно [4], струя жидкости, сохраняя свою первоначальную форму, поступает в камеру смешения, где на расстоянии двух-трех диаметров камеры смешения от начала камеры смешения заполнена молочно-белой водовоздушной эмульсией (пеной). У стенок наблюдаются обратные токи. Это возвратное движение обусловлено повышением давления по длине камеры смешения. При низких противодавлениях (в кавитационной области работы ЖГЭ) основное повышение давления происходит в диффузоре ЖГЭ. При увеличении противодавления на выходе из ЖГЭ происходит более значительное увеличение давления в камере смешения, наблюдается скачок давления по длине ЖГЭ. После него в проточной части ЖГЭ движется не молочно-белая эмульсия, а ГЖС пузырьковой структуры (вода с пузырьками газа). При дальнейшем увеличении противодавления на выходе из ЖГЭ скачок давления смещается к соплу и происходит «запирание» ЖГЭ, то есть газ перестает эжектироваться. В зависимости от длины камеры в ЖГЭ может наблюдаться 3 типа режима течения [5]: 1 — ударный режим (недостаточная длина камеры смешения); 2 — режим разрушения струи (оптимальная длина камеры смешения); 3 — режим разрушения струи (чрезмерно большая длина камеры смешения). Третий режим характеризуется несколько меньшим коэффициентом полезного действия ЖГЭ в отличие от второго. Назначение ЖГЭ в схеме стенда — диспергирование и повышение давления ГЖС на входе в исследуемый ПЭЦН. Таким образом, при проведении испытаний необходимо выполнение следующих условий: в ЖГЭ должно происходить полное смешение жидкости и газа, и на его выходе должна образовываться стабильная пузырьковая структура ГЖС. Распределение давления по длине ЖГЭ не проводится в рамках данных исследований, так как не является определяющим, но осуществляется контроль над тем, что давление ГЖС на выходе из ЖГЭ выше давления пассивного потока газа.

Первым этапом исследования работы ПЭЦН на ГЖС является экспериментальное определение характеристик насоса на воде. Жидкость из бака 9 поступает в подпорный насос 3, который приводится в действие двигателем 8 с частотным преобразователем (ЧП) 9. Далее жидкость с высоким давлением нагнетается в сопло ЖГЭ 2. В это время газовая линия закрыта задвижкой 23. Жидкость прокачивается через систему, постепенно заполняет исследуемый насос 1. Когда жидкость полностью заполняет систему, то включается асинхронный двигатель 6, управляемый ЧП 7. Частота тока двигателя 6 устанавливается f = {40, 50, 60} Гц, что соответствует частоте вращения вала насоса n = {2 400, 3 000, 3 600} об/мин без учета скольжения. Затем поджимается задвижка 22 до тех пор, пока на входе в насос 1 не установится требуемое абсолютное давление = {0.6, 1.1, 2.1} МПа. Устанавливается стабильный режим, который отслеживается в режиме реального времени через инженерный интерфейс CoDeSys [6] на компьютере 15. Данный режим характеризуется постоянными показаниями датчиков давления на входе в насос 28, давления на выходе из насоса 29, давления по длине насоса P_i 32–55, давления активного потока жидкости в сопло ЖГЭ 30, давления пассивного (инжектируемого) потока газа на приеме ЖГЭ 31, а также постоянным перепадом давления на дифференциальном манометре 56. Одновременно замеряется потребляемая мощность при помощи мотор-весов оригинальной конструкции 13, сигнал с которых также передается в режиме реального времени. Сигналы датчиков обрабатываются программируемым логическим контроллером (ПЛК) 16, который передает результаты замеров дальше на компьютер 15. В результате замеряется распределение давления по длине насоса на жидкости при заданном диаметре сопла ЖГЭ. В течение нескольких минут записываются временные ряды давлений, которые впоследствии обрабатываются. Расход жидкости определяется по формуле (1). Коэффициенты расхода используемых сопел C_c определялись предварительно путем постановки дополнительного калибровочного эксперимента.

$$Q_ж = C_c \cdot \frac{\pi D_c^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2(P_{акт} - P_{пас})}{\rho_ж}} \quad (1)$$

Вторым этапом исследования работы ПЭЦН на ГЖС является снятие характеристики при наличии свободного газа в потоке. Задвижка 23 открывается, и от компрессора 4 подается газ через реометрический стенд 5, который по своей сути является расходомером газа по перепаду давления на диафрагме. Перепад давления замеряется дифференциальным манометром 56, а расход газа регулируется редуктором 24. Расход газа в условиях диафрагмы $Q_г(P_д)$ определяется по формуле (2), где коэффициенты A и B предварительно экспериментально определяются для каждой диафрагмы, а затем расход газа пересчитывается к условиям у приема ЖГЭ (3) и у входа в насос по формуле (4), температура газа $T_г$ принимается равной температуре жидкости $T_ж$ ввиду того, что теплоемкость воды намного больше теплоемкости воздуха. При подаче газа на входе в насос 1 растет давление ввиду увеличения объема прокачиваемой смеси. Температура жидкости $T_ж$ поддерживается в интервале 25–30 °C во время проведения эксперимента при помощи проточного теплообменника 12, через который прокачивается водопроводная холодная вода. Также делается допущение, что процесс изотермический, температура смеси не меняется от входа до выхода из насоса 1, хотя на самом деле может повышаться на 1–2 °C. Данный факт в конечном счете не влияет на качество расчета и получаемые результаты. Чтобы поддержать давление на входе в насос постоянным = {0.6, 1.1, 2.1} МПа, одновременно уменьшается подача по жидкости от подпорного насоса 3 при помощи ЧП 9. Так задается определенное значение входного объемно-расходного газосодержания, определяемое по формуле (5). Аналогично исследованию характеристики насоса на воде устанавливается стабильный режим, который отслеживается в режиме реального времени через инженерный интерфейс CoDeSys на компьютере 15. Данный режим характеризуется постоянными показаниями датчиков давления на входе в насос 28, на выходе из насоса 29, по длине насоса P_i 32–55, давления активного потока жидкости в сопло ЖГЭ 30, давления пассивного потока газа на приеме ЖГЭ 31, а также дифференциального манометра 56, соответственно и постоянным значением входного объемно-расходного газосодержания. Также замеряется потребляемая насосом мощность. Сигналы датчиков обрабатываются программируемым логическим контроллером (ПЛК) 16, который передает результаты замеров дальше на компьютер 15. В результате замеряется распределение давления по длине насоса на ГЖС при заданном диаметре сопла ЖГЭ. В течение нескольких минут записываются временные ряды давлений, которые впоследствии обрабатываются. Далее аналогичным образом входное объемно-расходное газосодержание повышается до тех пор, пока давление на выходе не станет меньше, чем давление на входе, либо пока насос не перестанет стабильно работать, что характеризуется

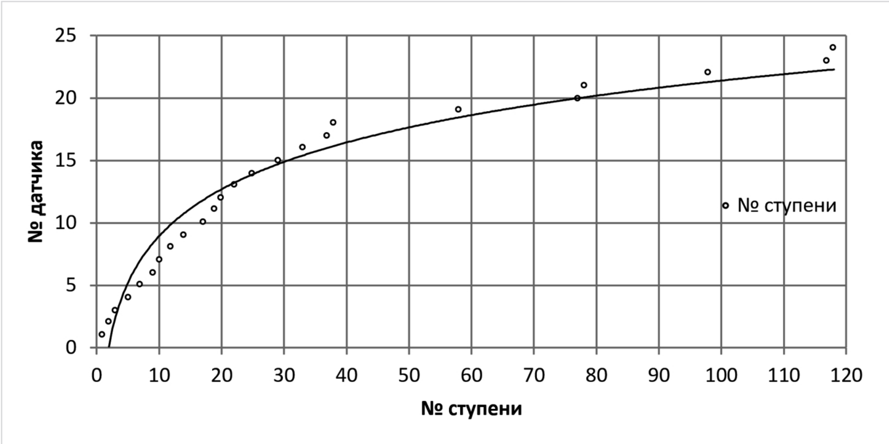


Рис. 3. Схема расстановки датчиков давления по длине насоса
Fig. 3. Sensor positioning scheme

повышением вибрации, а также волнообразным изменением давления во времени. Таким образом, снимается напорно-расходная и энергетическая характеристики ПЭЦН.

$$Q_г(P_д) = A \cdot \Delta P_{диф}^{B} \cdot \left(\frac{P_{атм}}{P_{диаф}}\right)^{0,5} \quad (2)$$

$$Q_г(P_{пас}) = Q_г(P_д) \cdot \frac{P_{диаф}}{P_{пас}} \quad (3)$$

$$Q_г(P_{вх}) = Q_г(P_{пас}) \cdot \frac{P_{пас}}{P_{вх}} \cdot \frac{T_ж}{T_г} \quad (4)$$

$$\beta_{вх} = \frac{Q_г(P_{вх})}{Q_г(P_{вх}) + Q_ж} \quad (5)$$

Помимо снятия характеристик ПЭЦН и распределения давления по длине насоса 1, стенд позволяет определять изменение дисперсности по длине исследуемого ПЭЦН 1. На требуемых режимах происходит видеофиксация с помощью высокоскоростной камеры 57 Phantom Miro eX4 [7], которая управляется компьютером 58, куда сохраняются снятые видеофайлы. Контроль дисперсности газовой фазы (то есть диаметра газового пузырька) осуществляется на входе в насос 1, через смотровой модуль 14, а также через смотровые ячейки 17–21. Смотровые ячейки спроектированы таким образом, что выдерживают давление ГЖС до 12 МПа. При прохождении ГЖС через насос из ступени с большим порядковым номером P_i часть объема смеси возвращается в ступень с меньшим порядковым номером P_{i-1}. При обработке данных по дисперсности газовой фазы смеси нами сделаны допущения: диаметр пузырька газа не меняется по сравнению с диаметром внутри ступени, а его давление $P_п$ рассчитывается как среднее давление между ступенями (6); пузырьки газа сохраняют свой размер и форму при попадании в смотровую ячейку из рабочего колеса ПЭЦН. В дальнейшем полученные видеофайлы обрабатываются в специальной программе, определяется ожидаемый диаметр газового пузырька при заданных условиях работы ПЭЦН.

$$P_п = \frac{P_i + P_{i-1}}{2} \quad (6)$$

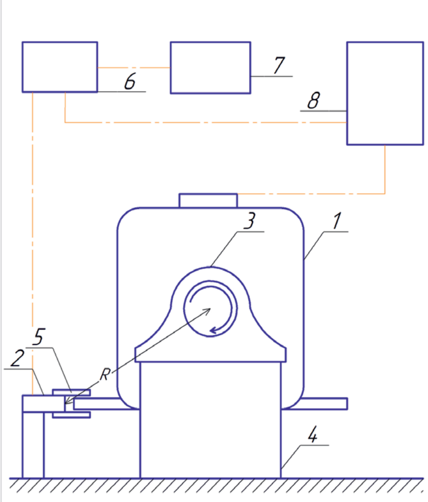
Цикл испытаний ПЭЦН является замкнутым, то есть жидкость после прохождения через насос 1 поступает в бак 10, для отделения жидкости от газа используется гравитационный полочный сепаратор 11.

Определение коэффициента полезного действия насоса

Одной из задач данного стенда является определение энергетических характеристик ПЭЦН, а именно потребляемой мощности и КПД насоса η. Зачастую при тестировании ПЭЦН потребляемая мощность замеряется ЧП, что не совсем корректно, так как ЧП замеряется полная электрическая мощность. Данная мощность состоит из активной и реактивной составляющих, а активная составляющая расходуется непосредственно на насос, а также на потери мощности в двигателе, питающем кабеле и др. Таким образом, получается завышенное значение потребляемой насосом мощности и соответственно заниженное значение КПД.

Для минимизации ошибки в определении разработана оригинальная конструкция мотор-весов на основе [8] (рис. 4). Стандартный асинхронный двигатель 1 модернизирован путем установки двух опорных подшипников вращения 3 на его вал сзади и рядом с полумуфтой. Подшипники установлены на станину 4, к которой жестко закреплен ПЭЦН. Так, при запуске двигателя ЧП 8, двигатель стремится вращаться из-за создаваемого момента. При отклонении двигателя от горизонтального положения он начинает давить с некоторой силой F на упорные пластины 5 тензометрического датчика 2. Соответственно тензодатчик 2 регистрирует показания силы F и передает их на ПЛК 6, с которого данные впоследствии транслируются на компьютер 7. Таким образом, реализован прямой замер потребляемой мощности. Ниже рассмотрим подробнее методику расчета КПД ПЭЦН при работе на ГЖС.

Как известно, работа асинхронного двигателя характеризуется разностью скоростей вращения ротора и изменения переменного магнитного потока, создаваемого обмотками статора двигателя переменного тока, причем эта разность меняется в зависимости от нагрузки на двигатель, то есть от создаваемого момента. Для используемого электродвигателя экспериментально была определена фактическая частота вращения вала двигателя при помощи лазерного тахометра. Зависимость фактической частоты вращения вала двигателя от момента вращения при различных частотах тока f = {30, 40, 50, 60} Гц (рис. 5).



1 — двигатель; 2 — тензометрический датчик; 3 — опорный подшипник; 4 — станина; 5 — упорные пластины; 6 — ПЛК; 7 — компьютер; 8 — ЧП

1 – motor; 2 – tenzometric sensor; 3 – support bearing; 4 – frame; 5 – thrust plates; 6 – PLC; 7 – computer; 8 – VFD

Рис. 4. Схема мотор-весов
Fig. 4. Scheme of motor-weights

Коэффициент полезного действия определяется как отношение полезно использованной мощности к потребляемой мощности к потребляемой мощности (7).

$$\eta = \frac{N_{пол}}{N_{потр}} \quad (7)$$

Потребляемая мощность исследуемого ПЭЦН рассчитывается по выражению (8). Момент вращения M находится через замеренную силу F при помощи тензодатчика и радиус вращения R по формуле (9). Число оборотов двигателя $n=n(M)$ определяется исходя из найденного момента M с учетом экспериментально полученных зависимостей (рис. 5). Ввиду того, что исследуемый ПЭЦН соединен с валом двигателя через приемный модуль, часть потребляемой мощности расходуется на вращение элементов приемного модуля. Предварительно была получена эмпирическая зависимость мощности холостого хода от частоты (работа двигателя без насоса, но с приемным модулем). Таким образом, для определения потребляемой мощности используется формула (10).

$$N_{потр} = M \cdot \omega = \frac{2\pi \cdot M \cdot n}{60} \quad (8)$$

$$M = F \cdot R \quad (9)$$

$$N_{потр} = \frac{2\pi \cdot (F \cdot R - M_{хх}) \cdot n(M)}{60} \quad (10)$$

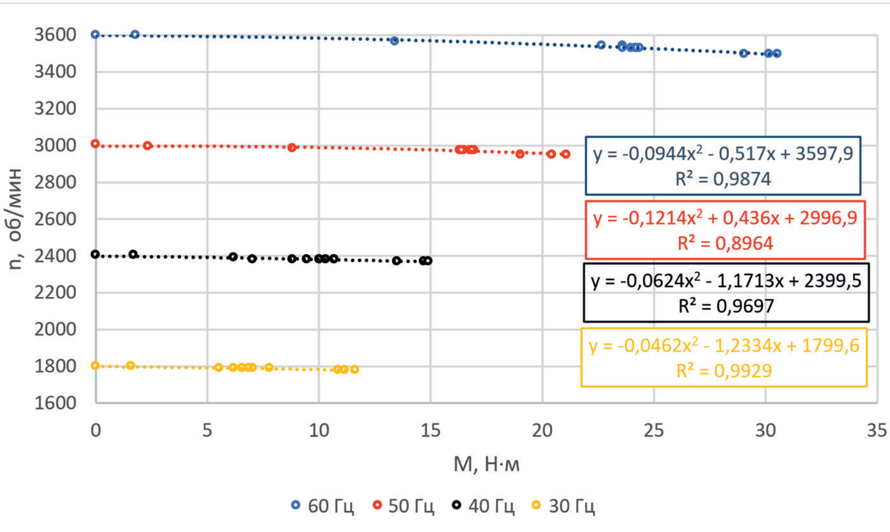


Рис. 5. Зависимость числа оборотов двигателя от момента вращения
Fig 5. Dependence of engine speed on torque

Полезная мощность гидравлической машины определяется выражением (11). Ввиду того, что исследуемый ПЭЦН перекачивает ГЖС, также необходимо учитывать изменение плотности перекачиваемой среды с ростом давления [1]. Среднеинтегральная подача насоса [1] определяется выражением (12). Так как процесс перекачки ГЖС принимается изотермическим, то выражение (12) легко преобразовать в (13). Таким образом, полезная мощность определяется выражением (14). Путем подстановки выражений (10) и (14) в (7) находится коэффициент полезного действия насоса n.

$$N_{пол} = Q \cdot (P_{вых} - P_{вх}) \tag{11}$$

$$Q = Q_{ср} = Q_{ж} + \frac{1}{P_{вых} - P_{вх}} \times \\ \times \int_{P_{вх}}^{P_{вых}} Q_{г}(P)dP \tag{12}$$

$$Q_{ср} = Q_{ж} + Q_{г}(P_{вх}) \times \\ \times \frac{P_{вх}}{P_{вых} - P_{вх}} \cdot ln\frac{P_{вых}}{P_{вх}} \tag{13}$$

$$N_{пол} = \left(Q_{ж} + Q_{г}(P_{вх}) \times \\ \times \frac{P_{вх}}{P_{вых} - P_{вх}} \cdot ln\frac{P_{вых}}{P_{вх}}\right) \cdot (P_{вых} - P_{вх}) \tag{14}$$

Итоги

На сегодняшний день проведен полный цикл исследований напорно-расходных и энергетических характеристик насоса ЭЦН5-50 (118 ступеней радиального типа) при частоте тока двигателя f = {40, 50, 60} Гц и абсолютном давлении на входе в насос = {0.6, 1.1, 2.1} МПа на модельных ГЖС «вода – воздух», «вода – ПАВ – воздух». Смесь «вода – воздух» моделирует высокообводненную скважинную продукцию с низкой пенообразующей способностью, а ГЖС «вода – ПАВ – воздух» используется для моделирования низкообводненной маловязкой скважинной продукции с высокой пенообразующей способностью [1]. Результаты проведенных экспериментальных исследований будут представлены в дальнейших работах автора.

Вывод

Созданный стенд позволяет исследовать работу ПЭЦН на ГЖС в широком диапазоне частот вращения вала и давлений на входе в насос. Разработанный стенд отличается оригинальностью:

- работа с избыточным давлением на входе в ПЭЦН вплоть до 3.0 МПа при частотах вращения вала до 3 600 об/мин;
- съемка газовых пузырьков в потоке ГЖС по длине ПЭЦН в любой точке напорно-расходной характеристики, а не только в режиме нулевого напора (режим работы ПЭЦН, при котором развиваемое насосом давление равно нулю);
- прямой замер потребляемой насосом мощности;
- регистрация распределения давления по длине насоса.

В дополнение к ГОСТ [9], созданный стенд позволяет проводить уникальные исследования ПЭЦН, которые являются актуальными при эксплуатации нефтяных механизированных скважин.

Условные обозначения

ГЖС	— газожидкостная смесь
ПЭЦН	— погружной электроцентробежный насос
ЖГЭ	— жидкостно-газовый эжектор
ЧП	— частотный преобразователь
КПД	— коэффициент полезного действия
CFD	— computational fluid dynamics (вычислительная гидродинамика)
PVT	— Pressure, Volume, Temperature
D_{c}	— диаметр сопла, мм
$D_{кс}$	— диаметр камеры смешения, мм
$L_{кс}$	— длина камеры смешения, мм
$P_{вх}$	— давление на входе в ПЭЦН, МПа
$P_{вых}$	— давление на выходе из ПЭЦН, МПа
$P_{п}$	— давление газового пузырька, МПа
P_{i}	— давление в i-ой ступени ПЭЦН, МПа
f	— частота тока, Гц
n	— частота вращения вала ПЭЦН, об/мин
$Q_{ж}$	— расход жидкости, м^3/сут
C_{c}	— коэффициент расхода сопла, д.ед
$N_{потр}$	— потребляемая мощность ПЭЦН, кВт
$N_{пол}$	— полезная мощность ПЭЦН, кВт
$\rho_{ж}$	— плотность жидкости, кг/м^3
$Q_{ср}$	— среднеинтегральная подача насоса, м^3/сут
F	— сила воздействия двигателя на тензодатчик, Н
R	— радиус вращения двигателя, м
ω	— угловая скорость вращения вала, рад/с
M	— момент вращения, Н·м
$M_{хх}$	— момент холостого хода, Н·м
η	— КПД насоса, %

ENGLISH

Results

For today the full cycle of researches of head and energy characteristics of pump ESP5-50 (118 stages of radial type) at frequency of a current of the motor f = {40, 50, 60} Hz and absolute pressure at pump intake P_in= {0.6, 1.1, 2.1} MPa on model gas-liquid mixture “water – air”, “water – surfactant –air" has been carried out. The mixture “water – air” simulates highly watercut low-foam-forming well products, and “water – surfactant – air” is used for modeling low-watercut low-viscosity well products with high foaming capacity [1]. The results of the experimental studies will be presented in further works of the author.

Conclusions

The created stand allows to study the ESP unit operation on gas-liquid mixture in a wide range of shaft speed and pressure at the pump intake. The developed stand is notable for its originality:

- Operation with pressure at the ESP intake up to 3.0 MPa and at shaft speeds up to 3 600 rpm;
- Shooting of gas bubbles in the gas-liquid mixture flow along the ESP length at any point of characteristic, not only in the zero head mode (ESP operation mode, when the pressure developed by the pump is equal to zero);
- direct measurement of power consumption by the pump;
- recording of pressure distribution along the pump length.

In addition to GOST [9], the stand allows to conduct unique studies of ESP installations, which are relevant for operation of oil mechanical wells.

References

1. Drozdov A.N. Development of a methodology for calculating the characteristics of a submersible centrifugal pump when operating wells with low pressures at the pump inlet. Moscow, 1982, 212 p. (In Russ).
2. Minigazimov M.G., Sharipov A.G., Research of gas influence on operation of the electric submersible pump ESP5-80-800. Oilfield engineering, 1968, issue 7. P. 34–38. (In Russ).
3. Litvinenko K.V. Prediction of the ESP technical state in the conditions of the intensive mechanical impurities removal. Ufa: USPTU, 2016, 22 p. (In Russ).
4. Sokolov E.Ya., Singer N.M. Jet devices. Moscow, Energoatomizdat, 1989, 352 p. (In Russ).
5. Cunningham R.G., Dopkin R.J. Jet Breakup and mixing throat lengths for the liquid jet gas pump. Journal of Fluids Engineering, 1974, Vol. 96, issue 3, P. 216–226. ISSN 0098-2202.
6. CODESYS programming environment. URL: https://owen.ru/product/codesys_v3
7. Docummentation. Software. URL: https://www.phantomhs.ru/doc/
8. Yaremenko O.V. Tests of pumps: the reference. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 225 p. (In Russ)
9. GOST ISO 9906-2015 Rotodynamic pumps. Hydraulic performance acceptance test. Grades 1, 2 and 3.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Горидько Кирилл Александрович, аспирант кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений», РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия
Для контактов: Goridko.ka@gubkin.ru

Goridko Kirill Aleksandrovich, ph.d. student of Petroleum Reservoir and Production Engineering Department, Gubkin University, Moscow, Russia
Corresponding author: Goridko.ka@gubkin.ru