Анализ адекватности традиционных методик пересчёта характеристик погружных электроцентробежных насосов при эксплуатации на высоковязких средах

Вербицкий Владимир Сергеевич
канд. техн. наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений, РГУ нефти и газа им. Губкина, verbitsky_vs@gubkin.ru,

Гиззатов Арсен Юнирович
магистрант, кафедра разработки и эксплуатации нефтяных месторождений, РГУ нефти и газа им. Губкина, arsengizzatov@mail.ru,

Валеев Данис Ирекович
магистрант, кафедра разработки и эксплуатации нефтяных месторождений, РГУ нефти и газа им. Губкина, danis_v02@mail.ru,

Андреева Евгения Евгеньевна
старший научный сотрудник, лаборатория геологического и экологического моделирования, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ Россия, aee8277@rambler.ru,

Баранова Анна Геннадьевна
старший научный сотрудник, лаборатория геологического и экологического моделирования, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ Россия, anna.genn@mail.ru

В практике расчёта рабочих режимов погружных насосов до сих пор широко применяются методики, базирующиеся на характеристиках перекачки воды и использующие эмпирические зависимости полувековой давности. Такой подход обусловливает существенные погрешности — в диапазоне 10–25 %, причём с ростом вязкости рабочей среды ошибка только увеличивается. В рамках настоящего исследования проведены стендовые испытания серийных насосов ВНН-5-125, ВНН-5-79 и ЭЦН5А-160 на жидкостях с вязкостью 100, 200 и 300 сСт. Погрешность измерений ключевых параметров (напор, расход, мощность) не превысила 5 %. Полученные данные свидетельствуют о недостаточной точности существующих методов пересчёта характеристик современных ЭЦН с водных режимов на работу с вязкими средами и подтверждают актуальность разработки универсальной расчётной методики, адаптированной к текущим конструкциям насосов и реальным условиям эксплуатации.
Ключевые слова: добыча нефти, вязкость флюидов, электроцентробежный насос, экспериментальная установка.

Введение

Освоение залежей трудноизвлекаемых углеводородов, характеризующихся повышенной вязкостью и плотностью флюидов, становится одним из приоритетных направлений нефтедобычи. Ключевым оборудованием для подъёма продукции из скважин остаются погружные электроцентробежные насосы. При этом алгоритмы подбора и прогнозирования рабочих режимов ЭЦН по-прежнему опираются на характеристики, полученные на воде, и не в полной мере отражают специфику работы с высоковязкими средами.

Для адаптации характеристик к вязким жидкостям традиционно применяют эмпирические поправочные коэффициенты. Наибольшее распространение получила поправка Ляпкова П. Д. [1], а также методика Мищенко И. Т. [2], которая интегрирована в современные программные решения — в частности, в модуль расчёта характеристик ЭЦН ПО Unifloc [5].

Однако за период, прошедший с момента разработки указанных методик, произошли значительные изменения в конструкции насосов, материалах и технологиях производства. Существующие отраслевые нормативные документы [4] также базируются на устаревших расчётных подходах, что снижает достоверность прогнозных оценок и может приводить к неоптимальному выбору режимов эксплуатации оборудования. Недостаток актуальных экспериментальных данных и современных расчётных моделей для условий работы ЭЦН на вязких средах обуславливает необходимость проведения комплексных исследований, включающих стендовые испытания, анализ результатов и разработку обновлённых расчётных алгоритмов. Представленные в статье результаты могут быть использованы для обоснования выбора рациональных режимов работы насосов в скважинах, эксплуатирующих залежи высоковязкой нефти.

Экспериментальная установка и методика испытаний

Для получения достоверных характеристик погружных центробежных насосов при работе на высоковязких жидкостях был создан специализированный испытательный стенд. Его принципиальная схема (рис. 1) включает асинхронный электродвигатель, бак с системой термостатирования, датчики давления и температуры, мерный бак для объёмного измерения расхода, а также исследуемый ЭЦН, соединённый через муфту с приводом.

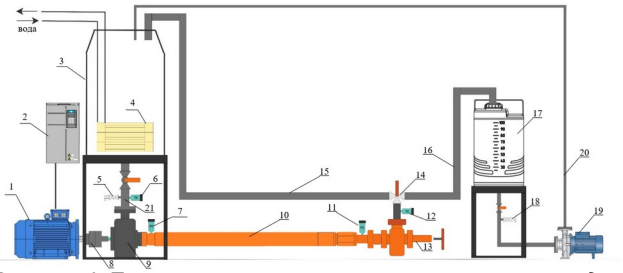


Рисунок 1. *Принципиальная схема испытательного стенда.*

(1 – асинхронный электродвигатель; 2 – ПЧ; 3 – бак; 4 – система охлаждения; 5, 18 – пробоотборник; 6, 12 – датчик температуры; 7, 11 – датчик давления, 8 - втулочно-пальцевая муфта МУВП; 9 – приемный модуль; 10 – исследуемый ЭЦН; 13 – регулируемый дроссель; 14 – трехходовой кран; 15 – выкидная линия; 16 – замерная линия; 17 – мерный бак; 19 – шестеренчатый насос; 20 – сливная линия мерного бака; 21 – всасывающая линия.)

Поддержание требуемого давления на входе в насос обеспечивалось за счёт гидростатического напора в баке. Диаметр подводящего трубопровода (50 мм) был выбран с учётом необходимости исключения кавитационных явлений при максимальных расходах. В качестве модельной среды применялась полиметилсилоксановая жидкость, вязкость которой регулировали варьированием соотношения компонентов (ПМС-200 и ПМС-1000) и управлением температурой в диапазоне 40–60 °C. Точность поддержания температуры на входе в насос составляла ±2 °C.

Требуемые значения вязкости достигались путём подбора концентраций компонентов смеси согласно данным табл. 1.

Таблица 1
Концентрации компонентов смеси для получения заданной вязкости рабочей среды

Необходимые значения вязкости	Концентрация смеси ПМС-200	Концентрация смеси ПМС-1000
300 сПз	75 %	25 %
400 сПз	55 %	45 %
500 сПз	40 %	60 %

Измерение расхода осуществлялось объёмным методом — по времени заполнения мерного бака при переключении трёхходового крана. Частота

вращения вала насоса поддерживалась на уровне 2910 об/мин. Крутящий момент на валу фиксировался с помощью тензометрических датчиков, установленных на приёмном модуле. Давление на входе и выходе насосной секции регистрировалось датчиками давления.

Методика проведения испытаний соответствовала требованиям ГОСТ 27893-88 [3]. Подходы к организации измерений и оценке погрешностей базировались на современных методических рекомендациях по стендовым исследованиям насосов [5], а также на специализированной методике испытаний на вязких средах, предложенной в работе Валеева Д. И. [9].

Обработка и анализ результатов испытаний

Результаты стендовых испытаний были подвергнуты комплексной обработке с целью выявления закономерностей изменения рабочих характеристик насосов при переходе с водной среды на вязкие жидкости. Для унифицированного сопоставления режимов работы использовали безразмерные параметры: по оси абсцисс откладывали относительную подачу (отношение текущего расхода на вязкой среде к расходу на воде в оптимальной точке), по оси ординат — коэффициенты деградации напора и КПД (отношения соответствующих параметров на вязкой среде и на воде при одинаковой относительной подаче).

Анализ результатов выявил специфику работы насосов типа ВНН, обусловленную наличием вихревых венцов на рабочих колёсах. В зоне подач выше оптимальной коэффициенты деградации напора и КПД для этих насосов стремятся к единице, что свидетельствует о меньшем снижении рабочих параметров по сравнению с типовыми ЭЦН. В свою очередь, для насосов типа ЭЦН в аналогичном диапазоне наблюдается устойчивое снижение коэффициентов на всём исследуемом интервале (рис.2).

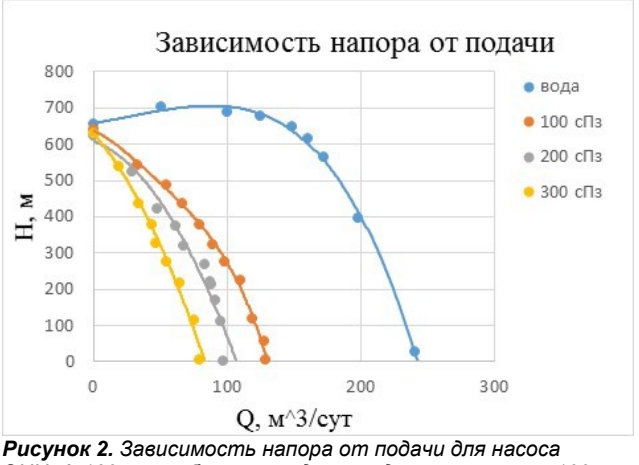


Рисунок 2. *Зависимость напора от подачи для насоса ЭЦН5А-160 при работе на воде и средах с вязкостью 100, 200, 300 сПз*

Выявленные различия, вероятно, связаны с гидродинамическим влиянием вихревых венцов. В области малых относительных подач венцы создают дополнительное сопротивление потоку, что усиливает деградацию характеристик. В правой части характеристики (при расходах выше оптимального) в насосах ВНН формируются застойные зоны между вихревыми венцами, которые способствуют выравниванию потока перед рабочим колесом и снижают гидравлические потери. Тем не менее данная интерпретация носит гипотетический характер и требует дополнительной экспериментальной проверки.

Отдельное внимание было уделено анализу напора в режиме нулевой подачи. Установлено, что предположение о прямой зависимости степени деградации напора в этой точке от номинальной производительности насоса не подтвердилось: деградация характеристик оказалась сопоставимой у насосов разной производительности. В то же время для насоса ЭЦН5А-160 зафиксировано существенно меньшее снижение напора в этом режиме — по всей видимости, из-за увеличенных габаритов насоса. Выдвинуто предположение, что для насосов габарита выше пятого потери напора в режиме нулевой подачи при работе на вязких средах становятся пренебрежимо малыми.

Закономерности влияния конструктивных параметров рабочих колёс на характеристики насосов рассмотрены в работе Фёдорова Д. К. [9], а механизмы формирования гидравлических потерь и деградации параметров при перекачке вязких сред — в исследовании Щукина Н. Н. [8]. Методика использования коэффициентов деградации для сравнительного анализа режимов работы ЭЦН на разных средах подтверждена практикой экспериментальных исследований [6].

Выводы

В ходе работы был разработан и введён в эксплуатацию экспериментальный стенд, на котором проведены испытания насосов типов ЭЦН и ВНН для построения напорно-расходных характеристик на воде и вязких жидкостях (в диапазоне вязкости 100–300 сПз). Анализ полученных данных позволил сформулировать ряд гипотез относительно поведения насосов в режиме нулевой подачи, а также оценить влияние конструктивных особенностей рабочих колёс (в частности, вихревых венцов) на эффективность работы оборудования при перекачке высоковязких сред.

Экспериментально подтверждено, что традиционные методики пересчёта характеристик ЭЦН (включая методику Ляпкова [1] и подход Мищенко [2]) демонстрируют значительную погрешность при применении к современным конструкциям насосов. При этом они не учитывают специфику конструктивных решений, характерных для отдельных типов оборудования (например, вихревые венцы в насосах ВНН). Это подчёркивает необходимость разработки обновлённой универсальной методики пересчёта напорно-расходной характеристики, основанной на актуальных экспериментальных данных и дифференцированно учитывающей конструктивные особенности серийных насосов.

Дальнейшее развитие расчётных подходов должно опираться на современные экспериментальные результаты и учитывать гидродинамические особенности течения в проточной части насосов [6, 9], а также использовать апробированные методические решения [9]. Существующие программные комплексы (включая Unifloc) нуждаются в модернизации [8] для обеспечения достоверного прогнозирования режимов работы ЭЦН при добыче высоковязкой нефти.

Литература

1. Ляпков, П. Д. Методика пересчёта характеристик центробежных насосов при перекачке вязких жидкостей / П. Д. Ляпков // Нефтепромысловое дело. — 1964. — № 5. — С. 23–29.
2. Мищенко, И. Т. Расчёты в добыче нефти : учебное пособие / И. Т. Мищенко. — Москва : Недра, 1989. — 245 с.
3. ГОСТ 27893-88. Насосы центробежные. Методы испытаний. — Москва : Издательство стандартов, 1988. — 42 с.
4. РД 39-0147035-215-87. Методика расчёта рабочих характеристик погружных центробежных насосов при откачке вязких нефтей. — Москва : Миннефтепром СССР, 1987. — 38 с.
5. Кузнецов, В. Г. Гидродинамика центробежных насосов: теория и практика / В. Г. Кузнецов. — Санкт-Петербург : Политехника, 2015. — 312 с.
6. Unifloc V7. Руководство пользователя. Модуль расчёта характеристик ЭЦН. — Москва : ООО «РН-УфаНИПИнефть», 2022. — 112 с.
7. Фёдоров, Д. К. Влияние конструктивных особенностей рабочих колёс на характеристики центробежных насосов / Д. К. Фёдоров // Вестник машиностроения. — 2019. — № 10. — С. 18–23.
8. Щукин, Н. Н. Гидравлические потери и деградация характеристик ЭЦН при работе на вязких жидкостях / Н. Н. Щукин // Труды НИИнефтемаш. — 2017. — Вып. 4. — С. 88–95.
9. Валеев, Д. И. Разработка методики стендовых испытаний погружных центробежных насосов при перекачке вязких жидкостей: магистерская диссертация / Д. И. Валеев ; РГУ нефти и газа (Губкинский). — Москва, 2020. — 112 с.

Analysis of the Adequacy of Traditional Methods for Recalculating the Characteristics of Submersible Electric Centrifugal Pumps Operating in High-Viscosity Fluids

Verbitsky V.S., Gizzatov A.Yu., Valeev D.I., Andreeva E.E., Baranova A.G.

Gubkin Russian State University of Oil and Gas; Institute of Problems of Ecology and Subsoil Use of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

Current practices for calculating the operating modes of submersible pumps still rely heavily on methodologies based on water-pumping characteristics and empirical relationships established fifty years ago. This approach leads to significant errors—ranging from 10% to 25%—with the margin of error increasing as the viscosity of the pumped fluid rises. This study involved bench testing of standard VNN 5-125, VNN 5-79, and ETsN5A-160 pumps using fluids with viscosities of 100, 200, and 300 cSt. Measurement errors for key parameters (head, flow rate, and power) did not exceed 5%. The results demonstrate the insufficient accuracy of existing methods for converting the performance characteristics of modern electric submersible pumps (ESPs) from water-based operation to operation with viscous fluids; they also underscore the need to develop a universal calculation methodology adapted to current pump designs and actual operating conditions.

Keywords: oil production, fluid viscosity, electric submersible pump, experimental setup.

References

1. Lyapkov, P. D. Methodology for recalculating centrifugal pump characteristics when pumping viscous fluids / P. D. Lyapkov // Oilfield Engineering. — 1964. — No. 5. — P. 23–29.
2. Mishchenko, I. T. Calculations in Oil Production: A Textbook / I. T. Mishchenko. — Moscow : Nedra, 1989. — 245 p.
3. GOST 27893-88. Centrifugal Pumps. Test Methods. — Moscow : Standards Publishing House, 1988. — 42 p.
4. RD 39-0147035-215-87. Methodology for Calculating Operating Characteristics of Submersible Centrifugal Pumps When Pumping Viscous Oils. — Moscow : Ministry of Petroleum Industry of the USSR, 1987. — 38 p.
5. Kuznetsov, V. G. Hydrodynamics of Centrifugal Pumps: Theory and Practice / V. G. Kuznetsov. — Saint Petersburg : Politekhnika, 2015. — 312 p.
6. Unifloc V7. User Manual. ESP Characteristic Calculation Module. — Moscow : RN-UfaNIPIneft LLC, 2022. — 112 p.
7. Fedorov, D. K. Influence of Impeller Design Features on Centrifugal Pump Characteristics / D. K. Fedorov // Russian Engineering Research (Vestnik Mashinostroeniya). — 2019. — No. 10. — P. 18–23. 8. Shchukin, N. N. Hydraulic losses and performance degradation of ESPs operating with viscous fluids / N. N. Shchukin // Proceedings of NIINeftemash. — 2017. — Issue 4. — P. 88–95.
9. Valeev, D. I. Development of a bench testing methodology for submersible centrifugal pumps handling viscous fluids: Master's thesis / D. I. Valeev ; Gubkin Russian State University of Oil and Gas. — Moscow, 2020. — 112 p.