

УДК 622.276.054.23

EDN QPLIWC

А.В. Павлов
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСТАНОВОК
ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ
В РОССИЙСКИХ УСЛОВИЯХ НЕФТЕДОБЫЧИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлен обзор существующих конструкций установок погружных электроприводных центробежных насосов (УЭЦН) для добычи нефти. Рассмотрены области их применения, включая наиболее перспективные: осложненный фонд скважин после капитального ремонта, боковые стволы малого диаметра, системы одновременно-раздельной эксплуатации, а также колтюбинговые установки и системы на кабель-канате. Продемонстрированы растущие объемы рынка УЭЦН, в том числе, в сегменте малогабаритных конструкций, что подтверждает актуальность и востребованность дальнейших разработок данного оборудования для соответствия современным реалиям их эксплуатации. Представлен анализ существующих методик разработки проточной части центробежных насосов и обоснован выбор в пользу наиболее перспективного и эффективного на сегодняшний день метода компьютерного моделирования.

Ключевые слова: установка электроприводного центробежного насоса, механизированные методы добычи, центробежная ступень, математическая модель, вычислительная гидродинамика, CFD-моделирование.

Введение

В настоящее время можно выделить три основных способа извлечения флюида из добывающей скважины: фонтанный, газлифтный и насосный. На территории Российской Федерации более 90 % [1] скважин разрабатывается с помощью механизированных методов добычи; к ним относятся штанговые и бесштанговые. Последние включают использование центробежных, винтовых, гидропоршневых, струйных, а также диафрагменных насосов. Однако наибольшее распространение среди бесштанговых насосных технологий получили установки погружных электроцентробежных насосов ввиду наибольшей приспособленности к Российским реалиям добычи [2]. Также фонд скважин, оборудованных ЭЦН, превышает аналогичный показатель для штанговых насосных установок (УШГН) более чем в два раза за 2020-2022 гг. (рис. 1).

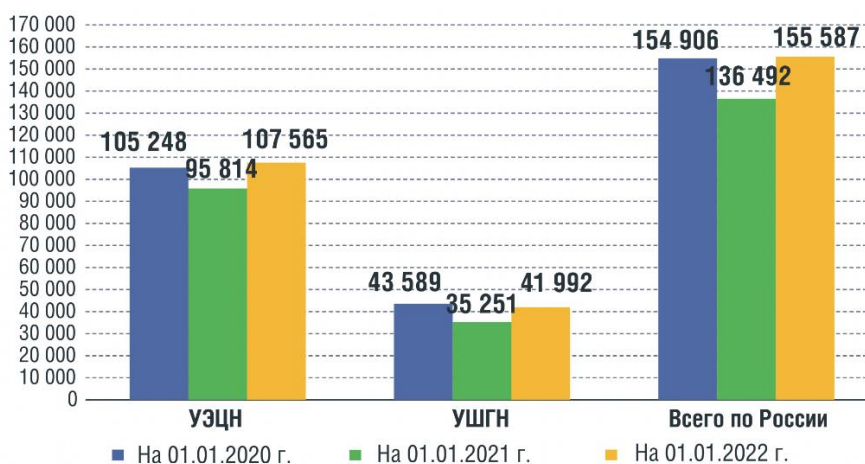


Рис. 1. Фонд скважин УЭЦН и УШГН за 2020-2022 гг. [2]

Конструкция и типы сборок УЭЦН

Установка электроприводного центробежного насоса представляет собой комплекс технических устройств и оборудования, расположенных в скважине и на поверхности (рис. 2). Погружная часть электронасосного агрегата состоит из: электродвигателя с гидрозащитой; газосепаратора; центробежного насоса; обратного и сливного клапанов; а также вспомогательных узлов, смонтированных на колонне НКТ внутри эксплуатационной колонны. На поверхности устанавливаются: трансформатор, станция управления (опционально – с частотным регулятором) и кабельный барабан. Погружной центробежный насос является многоступенчатой машиной. Данное техническое решение обусловлено малым значением напора каждой из его ступеней. В зависимости от типоразмера и исполнения, напор может составлять от 3 до 7 м водяного столба жидкости (рис. 3).

Конструкция ступеней погружного центробежного насоса обусловлена требуемыми эксплуатационными характеристиками. Одним из основных параметров, характеризующих геометрию насосной ступени, является коэффициент ее быстроходности. На рис. 4 представлены типовые конструкции центробежных колес с различными значениями коэффициента быстроходности.

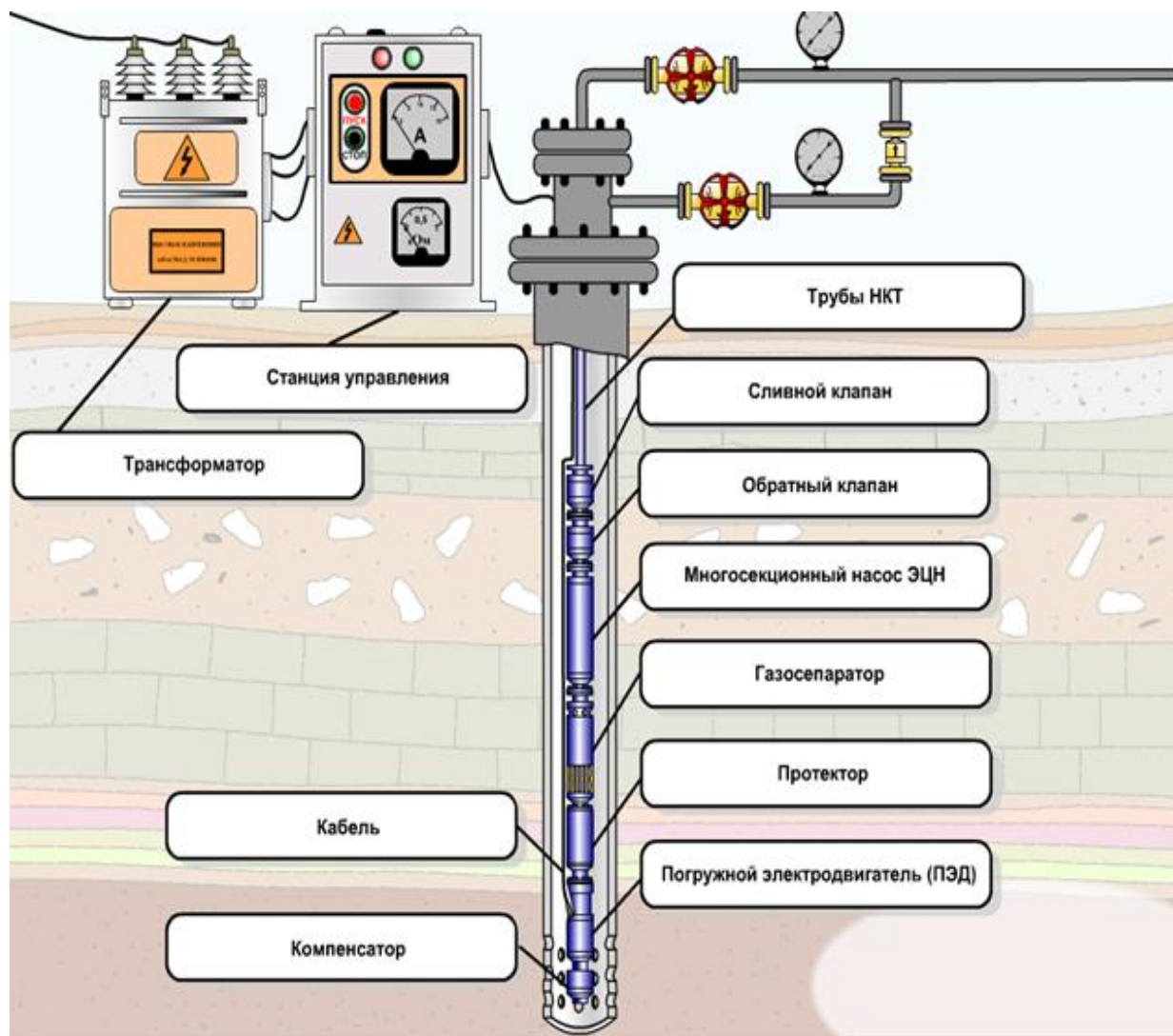


Рис. 2. Установка электроприводного центробежного насоса



Рис. 3. Принципиальная конструкция погружного насоса

Параметр рабочих колес	Центробежные			Полуосевые (диагональные)	Осевые
	тихоходные	нормальные	быстроходные		
n_z	50–90	80–180	150–300	250–500	500–1000
Сечение рабочего колеса					
D_2/D_0	3,0–2,5	2,5–1,4	2,5–1,4	1,4–0,9*	0,8*
Форма лопасти	Цилиндрическая	Двойной кривизны на входе, цилиндрическая на выходе.	Двойной кривизны	Двойной кривизны	Двойной кривизны
Характеристика					

Рис. 4. Типы центробежных колес

Конструкция скважинного центробежного насоса может быть обычной и износостойкой, а также повышенной коррозионной стойкости (рис. 5). Диаметры и состав основных узлов насоса одинаковы для всех исполнений насоса [3].



Рис. 5. Типы сборок УЭЦН [5]



Рис. 6. Классификация УЭЦН [5]

В табл. 1 представлены стандартные диаметральные ограничения для 12 типовых габаритных групп установок электроприводных центробежных насосов.

Таблица 1.
Габаритные группы УЭЦН [5]

Габарит	Диаметр насоса	Габарит	Диаметр насоса
2	55 мм	6	114 мм
2А	69 мм	6А	123 мм
3	81 мм	6Б	130 мм
4	86 мм	7А	136 мм
5	92 мм	8	172 мм
5А	103 мм	9	185 мм

Область применения УЭЦН

УЭЦН предназначены для откачки из скважин пластовой жидкости, содержащей нефть, воду, газ и механические примеси [3]. Их основные области применения:

- 1) вертикальные и наклонно-направленные скважины стандартного диаметра;
- 2) боковые стволы малого диаметра;
- 3) сильно искривленные скважины со сложной инклинометрией;

- 4) системы одновременно-раздельной эксплуатации;
- 5) системы УЭЦН на кабель-канате и колтюбинговые установки;
- 6) скважины с технологическими ограничениями после капитального ремонта.

Классическим методом использования УЭЦН является компоновка скважинной части установки, смонтированная на колонне НКТ в вертикальной скважине. Данным способом эксплуатируется большая часть данных установок. Компоновка скважинного оборудования в данном случае не подразумевает использование дополнительных элементов конструкции и узлов в специальном исполнении. Примером данной компоновки может служить конструкция, проиллюстрированная на рис. 2. Боковые стволы малого диаметра (БСМД). В российской нефтегазовой отрасли долгое время существовала тенденция к стимулированию освоения новых нефтегазовых провинций. Это привело к значительному увеличению простаивающего фонда скважин. Наиболее перспективным методом оптимизации и ввода в эксплуатацию простаивающего фонда является зарезка боковых стволов малого диаметра. Данный способ положительно сказывается на экономической составляющей, позволяя сократить расходы на 30-40 % по сравнению со строительством новой скважины. Для спуска в БСМД используются малогабаритные установки 2А и 3 габарита.

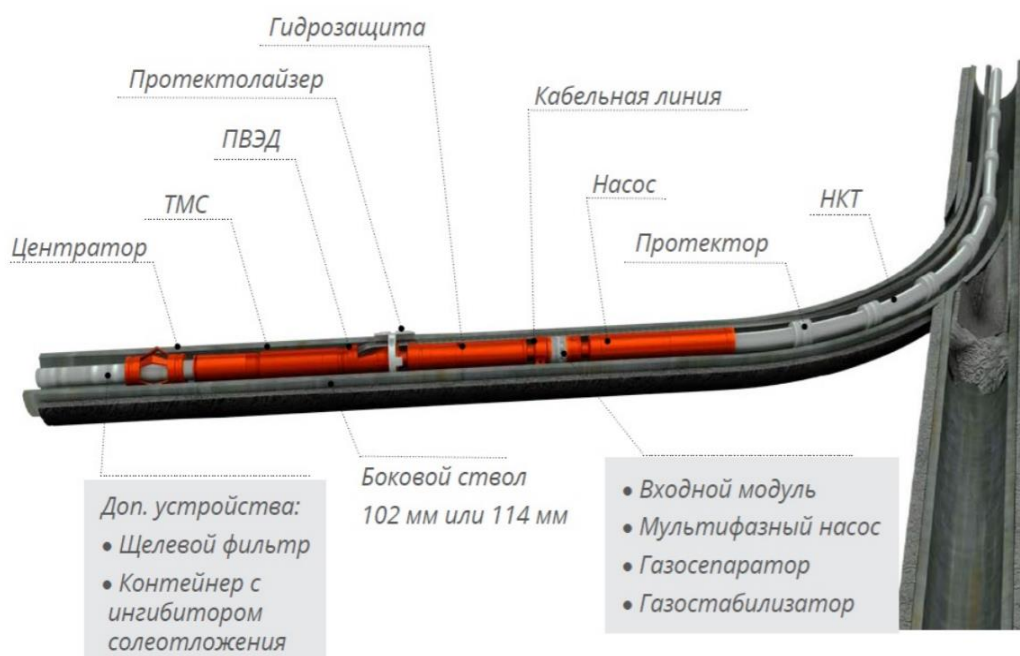


Рис. 7. Компоновка УЭЦН в БСМД

В сильно искривленных скважинах, как и в боковых стволах малого диаметра, используются установки, оснащенные специальными гибкими муфтами между ее секциями (рис. 8) [4].

Отдельной подобластью применения малогабаритных установок электроприводных центробежных насосов являются системы Y-Tool [5]. Байпасные системы (системы Y-Tool) относятся к скважинному оборудованию, которое используется в установках УЭЦН. Системы Y-Tool делают возможным эксплуатацию нескольких продуктивных горизонтов через одну скважину, при этом параллельно проводить исследования по каждому из объектов без демонтажа насосной установки (рис. 9) [6]. Все существующие на сегодняшний день системы ОРЭ можно условно разделить на два типа: однолифтовые и двухлифтовые установки. Наибольшее распространение и разнообразие исполнений имеют двухлифтовые установки. Среди множества предлагаемых решений одновременно-раздельной эксплуатации скважин можно выделить решения следующих российских разработчиков: ОАО «ЛифтОйл», ОАО

«Нововет-Пермь», институт «ТатНИПИнефть», «УфаниПИнефть». В мировой практике добычи нефти данное направление широко используется французскими и американскими нефтяными компаниями.

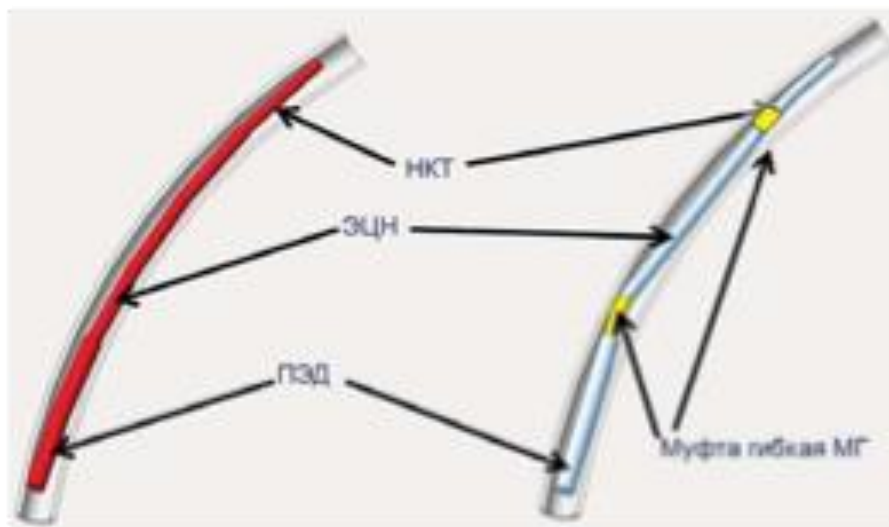


Рис. 8. Использование гибких муфт в сборке УЭЦН

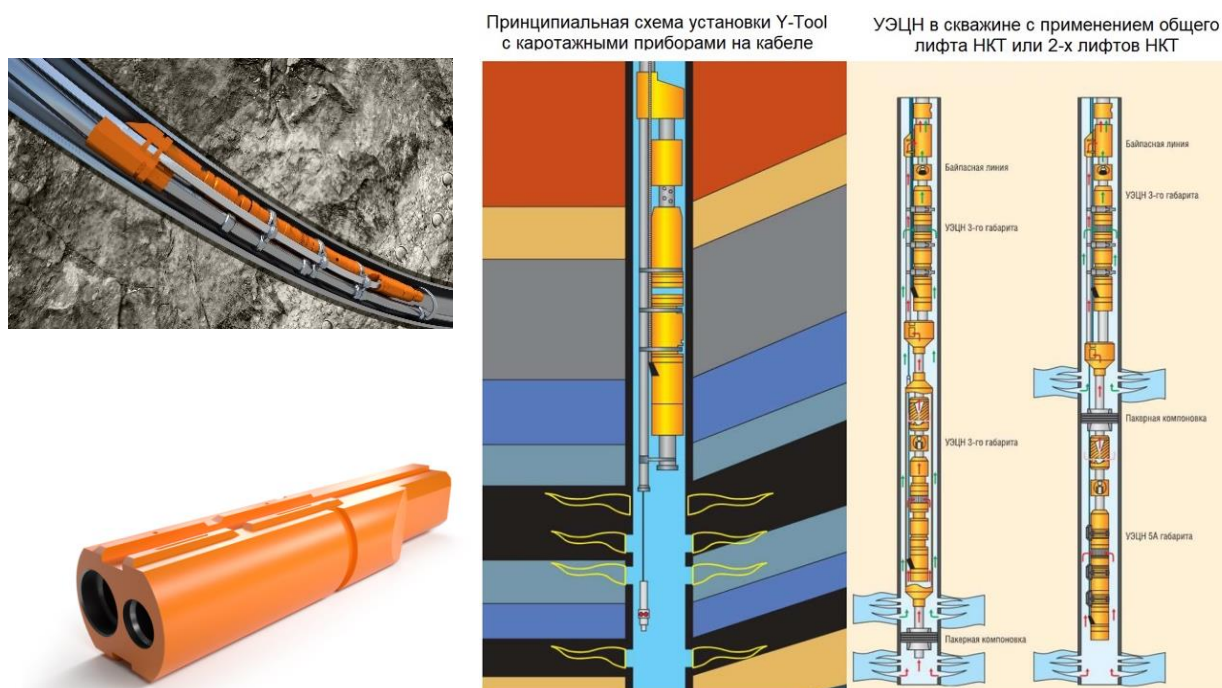


Рис. 9. Способы применения системы Y-Tool (ОАО «Нововет-Пермь»)

Помимо боковых стволов малого диаметра и систем байпасирования, малогабаритные УЭЦН все чаще находят применение в новых перспективных системах, спускаемых в скважину на кабель-канате по беструбной технологии (рис. 10, 11). Также к быстроустанавливаемым системам относятся установки оснащенные ГНКТ (колтюбинг), использующиеся при капитальном ремонте скважин.



Рис. 10. Технология Colibri ESP на кабель-канате [5]



Рис. 11. Колтюбинговая установка

Объемы рынка

Объемы выпуска УЭЦН в России демонстрируют небольшой, но стабильный рост. Средний годовой темп роста за период 2010-2017 гг. составил 1,8 %. Стабильность российского производства УЭЦН сопровождается стабильностью в структуре производителей. Большую часть продукции обеспечивают четыре завода (рис. 12): «Борец» (Москва), «Новомет-Пермь» (Пермский край), «Schlumberger/Baker Hughes» (Ханты-Мансийский АО) и «Алнас» (Татарстан, группа «Римера»). Выраженной тенденцией является увеличение концентрации внутреннего производства крупнейшими участниками рынка.

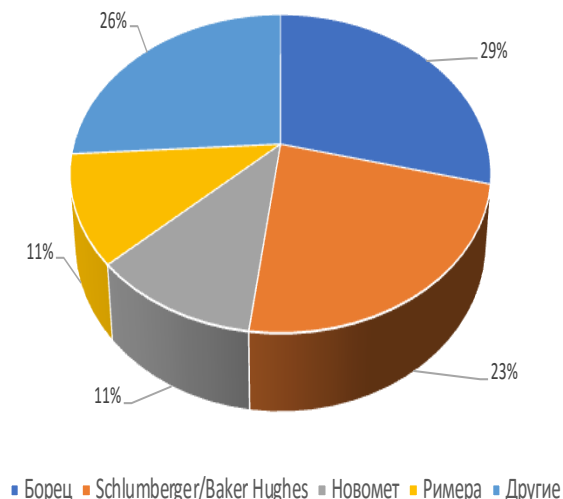


Рис. 12. Доли рынка производителей УЭЦН в России [8]

Импорт УЭЦН в настоящее время сокращается. Максимального значения за рассматриваемый период импорт полнокомплектных УЭЦН достиг в 2013 г. – 2118 ед., или 3384 млн руб. В 2015-2017 гг. активность зарубежных производителей на российском рынке снизилась (табл. 2): объем поставок установок сократился до уровня 100-250 ед. в год. Показатели 2017 г. – 102 ед. на сумму 646 млн руб. (меньше на 54,9 и на 70,1 % соответственно по сравнению с предыдущим годом) [7].

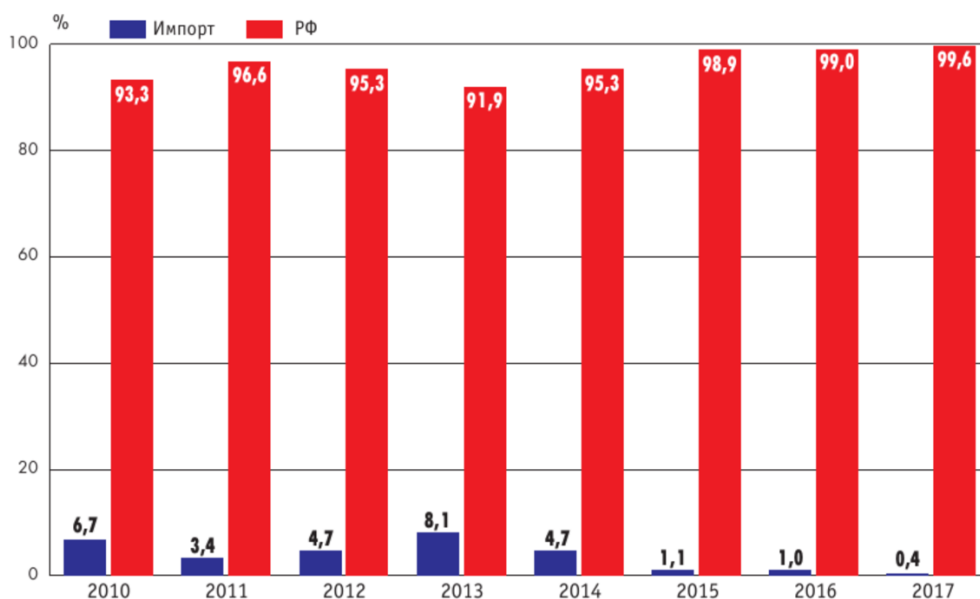


Рис. 13. Соотношение импортной и российской продукции

Таблица 2.
Торговый баланс российского рынка УЭЦН, тыс. ед. [7]

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Внутреннее производство	20,0	21,0	21,8	22,0	22,2	21,8	22,6	23,9
Импорт	1,4	0,7	1,1	2,1	1,2	0,2	0,2	0,1
Экспорт	0,3	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
Объем рынка	21,1	21,6	22,7	24,1	23,3	22,0	22,8	23,9

К крупным зарубежным производителям УЭЦН можно отнести: «REDA» (Дочерняя компания Schlumberger, Хьюстон, Техас, США), Weatherford (Хьюстон, Техас, США), Centrilift (Дочерняя компания Baker Hughes, Великобритания).

Проектирование ступеней динамических машин

Вопросы, связанные с проектированием формы рабочих органов и геометрии их проточной части, не теряют своей актуальности с момента их создания. С каждым годом все больше возрастают требования к эксплуатационным характеристикам ступеней ЭЦН, способных работать в сложных пластовых условиях при широком ряде осложняющих факторов. Сложность создания и проектирования ступеней динамических машин связана с геометрией проточной части рабочих колес и направляющих аппаратов, которая имеет переменные по площади сечения, что не позволяет использовать простые гидравлические зависимости, введенные для расчета движения жидкостей в трубах.

Существует два типа гидродинамических задач, связанных с проектированием ступеней динамических насосов: прямые и обратные. Прямая задача подразумевает определение технических возможностей насоса при известной форме ступени и особенностях геометрии проточной части. Обратной является профилирование проточной части каналов с целью получения заданных характеристик. Для решения задач такого типа создаются различные математические модели, описывающие движение жидкости в ступенях динамических насосов. Большинство математических моделей основано на базе уравнений Эйлера, по которой в результате передачи энергии от лопастного колеса жидкости, создается напор, который принято называть теоретическим, а затем за счет преодоления гидравлических потерь происходит его снижение до действительного [9]. Точность моделей зависит от определения скоростей в характерных точках и метода расчета потерь. В настоящий момент наиболее подробно изучены математические модели [10-12], описывающие работу насоса в оптимальном режиме. В то же время пока что не существует моделей, которые бы могли с достаточной точностью описать работу на малых или больших подачах, находящихся за границей рабочей области. В случаях, когда невозможно найти математическое решение рассматриваемого процесса движения жидкости, используются теории подобия.

Наиболее перспективным методом разработки ступени ЭЦН является конструктивно-аналитический. При использовании такого метода геометрические размеры меридиального сечения определяют с учетом статистических зависимостей конструктивных коэффициентов в зависимости от критериев подобия, а угловые размеры лопастей рассчитывают по струйной теории и по экспериментально полученным зависимостям. Компании, занимающиеся изготовлением погружных насосов для добычи нефти, используют данную методику для создания модели ступени, и выполняют расчет характеристик получившегося изделия с помощью компьютерного моделирования (CFD – вычислительная гидродинамика) в различных программных пакетах. Дальнейшее проектирование ступени основано на анализе полученных данных и изменении ее проточной части с учетом картин распределения давлений, скоростей, и направлений потоков.

Ниже представлены картины распределения скоростей и давлений центробежно-осевой ступени ЭЦН габарита 2А, являющейся прототипом реально существующей ступени ЭЦНО2А-25(40) [13], выполненные в программном пакете SolidWorks Flow. Данные графические и численные результаты компьютерного моделирования (рис. 14) могут быть экстраполированы для дальнейших модификаций проточной части насосных ступени с целью увеличения ее эксплуатационных характеристик.

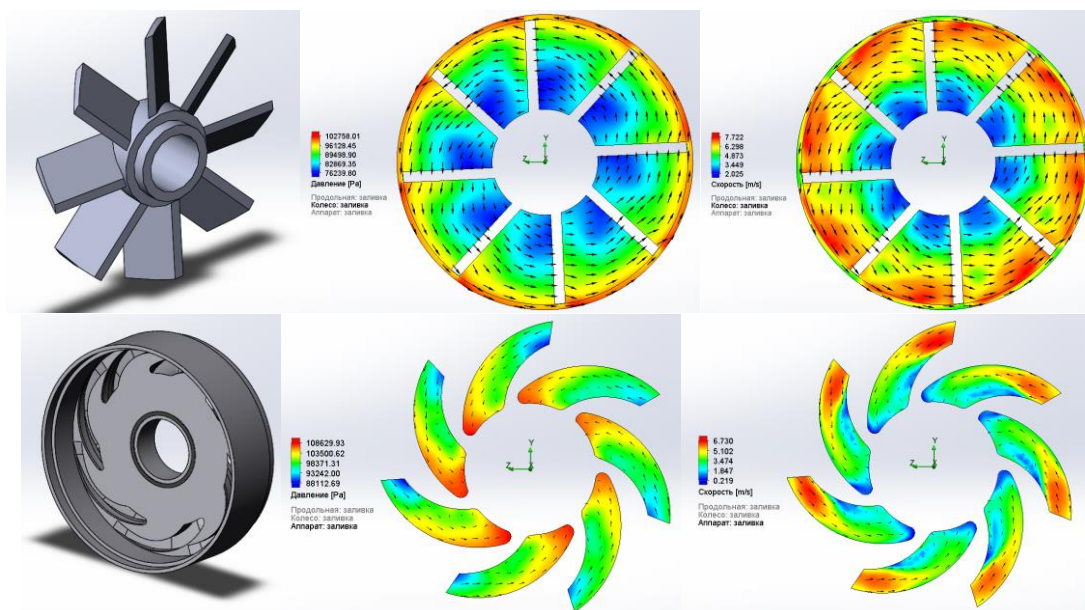


Рис. 14. Трехмерные модели картины в сечениях ступени ЭЦН открытого типа:
слева направо: 3D – модель, картина распределения давлений, картина распределения скоростей

Для расчета ступеней центробежных насосов могут быть применяться различные программные пакеты: AcuSolve; ADINA; Advanced Simulation Library; ANSYS CFX; ANSYS Fluent; Autodesk Simulation CFD; Comsol Multiphysics; SW Flow Simulation; FloEFD; FlowVision; OpenFOAM; Phoenix; Star-CCM+; Stallion 3D; XFlow; Логос. Для моделирования турбулентных течений в программных пакетах могут быть реализованы несколько моделей турбулентности: L-VEL, уPlus, Спаларта-Аллмараса, k-ε, k-ω, низкорейнольдсовая k-ε, SST. В ряде программ могут использоваться несколько моделей, которые устанавливаются при формировании настроек расчета.

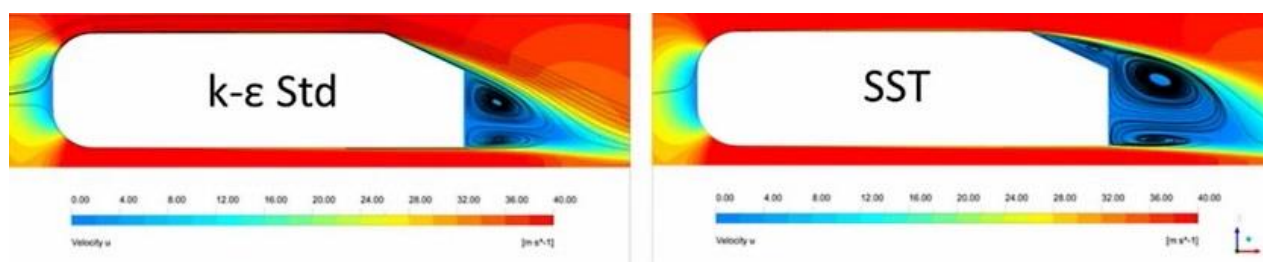


Рис. 15. Отличие k-ε и SST моделей турбулентности

Выбор модели турбулентности является критическим аспектом CFD-расчета. Неправильный выбор может привести к существенным ошибкам в определении характеристик потока и, следовательно, к некорректным результатам. Кроме того, разные модели турбулентности могут иметь различные вычислительные требования и возможности. При выборе модели турбулентности необходимо учитывать следующие факторы:

- 1) *тип потока*: различные модели турбулентности лучше подходят для разных типов потоков, таких как ламинарные, переходные или турбулентные;
- 2) *геометрия*: геометрическая сложность задачи может влиять на выбор модели турбулентности, поскольку некоторые модели могут быть более устойчивыми к геометрической сложности;
- 3) *требования к точности*: если требуется высокая точность результатов, следует выбирать более сложную модель турбулентности;

- 4) *вычислительные ресурсы*: более сложные модели турбулентности могут требовать больше вычислительных ресурсов, поэтому необходимо учитывать возможности компьютера или кластера.

Заключение

На фоне общего снижения нефтедобычи в России спрос на УЭЦН продолжает расти. Он обусловлен рядом факторов: высокими эксплуатационными показателями данных установок, а также сложностью разработок на большинстве отечественных месторождений. Крупные нефтяные компании инвестируют значительные средства в развитие технологий УЭЦН, что стимулирует спрос на высокотехнологичное погружное оборудование. Узлом, обеспечивающим основные характеристики погружного насосного агрегата, является его центробежная ступень, проектирование и оптимизация формы которой является основной проектной задачей в области проектирования насосов.

Установлено, что в компьютерном эксперименте по моделированию потока жидкости одним из важнейших этапов является выбор модели турбулентности. Для расчета характеристик рабочих колес закрытой конструкции, где отсутствуют перетоки жидкости между лопастями, и вихревые потоки в зазорах между дисками и стенками направляющих аппаратов не оказывают значительного влияния на финальную характеристику ступени, допускается использование k - ϵ модели турбулентности при достаточном дроблении сетки в зазорах и местах со сложной геометрией. Для ступеней полузакрытой и открытой конструкции, а также колес, оснащенных вихревым импеллером, целесообразнее использовать модель турбулентности SST, которая представляет собой комбинацию k - ϵ и k - ω моделей турбулентности: для расчета течения в свободном потоке используются уравнения k - ϵ модели, а в области вблизи стенок – уравнения k - ω модели.

Вычислительная гидродинамика является отличным и незаменимым инструментом в проектировании ступеней ЭЦН. Ценность CFD-расчета многократно возрастает, когда четко сформулированы не только цели эксперимента, но и ресурсы, необходимые для его корректного выполнения.

Библиографический список

1. **Пармухина Е.** Обзор российского рынка УЭЦН // Нефть и капитал. 2018. № 10. С. 34-37.
2. Механизированная добыча нефти. Итоги и прогнозы // Электронный журнал Neftegaz.RU. 2022. № 6.
3. Установки погружных электроцентробежных насосов (УЭЦН) // Электронный журнал Neftegaz.RU. 2012. № 5.
4. **Мартюшев Д.Н., Харламов П.А., Слепченко С.Д., Невоструев В.А.** Малый габарит для большой добычи // Нефтегазовое дело. 2017. № 3.
5. Новомет. Байпасная система (Y-Tool): сайт производителя. – URL: <https://www.novometgroup.com/rus/products-and-services/artificial-lift/y-tool-esp-bypass-system/> (дата обращения: 28.03.2023). – Текст: электронный.
6. **Боровик, О.В.** Анализ применения системы байпасирования Y-tool для исследований под действующей УЭЦН на месторождениях краснодарского края / О.В. Боровик, О.В. Савенок // Наука и Техника. 2017. № 2.
7. Обзор технологии Colibri ESP. УЭЦН 2А габарита на грузонесущем кабеле. / Группа компаний Новомет – 22 с. – URL: <https://novomet.ru/rus/products-and-services/artificial-lift/electrical-submersible-pumping-systems/rigless-colibri-esp/?ysclid=lfscpow45j262865659> (дата обращения: 13.02.2023). – Текст: электронный.
8. «Борец» – мировой лидер нефтяного машиностроения. – URL: <https://rusbonds.ru/blogs/8669> (дата обращения: 02.02.2023). – Текст: электронный.

9. **Ивановский, В.Н.** Проектирование и исследование ступеней динамических насосов / В.Н. Ивановский, А.А. Сабиров, А.В. Деговцев и др.: учебное пособие. – М.: Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. – 102 с.
10. **Степанов, А.И.** Центробежные и осевые насосы. Теория, конструирование и применение. – М.: Гос. научно-техн. изд-во машиностроительной литературы, 1960. – 464 с.
11. **Боровский, Б.И.** Энергетические параметры и характеристики высокооборотных лопастных насосов. – М.: Машиностроение. 1989. – 184 с.
12. **Руднев С.С.** Обратные течения на входе в рабочее колесо и их влияние на форму напорной характеристики центробежных насосов / С.С. Руднев, В.И. Мелашенко // «Труды ВНИИГидромаш», М.,1968. Вып. 37.
13. **Бортников, А.Е.** О возможности эксплуатации боковых стволов малого диаметра установками электроцентробежных насосов с открытыми рабочими колесами на примере месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» / А.Е. Бортников, В.Н. Ивановский, А.В. Кузьмин и др. // Территория Нефтегаз. 2018. № 4. С. 28-32
14. **Павлов, А.В.** Погружные электроцентробежные насосы. Конструкция, область применения, проектирование // В сб.: Будущее технической науки. Нижний Новгород: НГТУ, 2023.
15. **Русецкая, Г.В.** Теоретические основы математической модели динамики потока в центробежном насосе // Транспортные системы. 2020. № 1. С. 56-64.