

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ И СПЕЦИФИКА РАСЧЕТА ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СЕКЦИЙ ПОГРУЖНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

В.В. Иванькина

viktory.ivanykina@mail.ru

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

Аннотация

Проведено исследование фланцевых соединений секций установок электроцентробежных насосов. Рассмотрено устройство установок электроцентробежных насосов для добычи нефти. Приведены показатели их надежности. Проведен анализ характера и причин отказов установок. Определено, что причиной отказов типа расчленение секций установок более чем в 30 % случаев является разрыв в зоне фланцевых соединений секций. Рассмотрены проблемы применения и проектирования фланцевых соединений, используемых для соединения секций электроцентробежного насоса. Выявлена возможность возникновения дополнительных нагрузок, не учитываемых при стандартном расчете. Установлено, что при прочностном расчете фланцевых соединений необходимо дополнительно учитывать переменный изгибающий момент, который обусловлен произвольным изгибом насоса в ограниченной размерами обсадной колонны зоне.

Ключевые слова

Фланцевые соединения секций, электроцентробежный насос, показатели надежности, переменный изгибающий момент, прочностной расчет

Поступила в редакцию 20.05.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Установки электроцентробежных насосов (УЭЦН) являются наиболее используемым оборудованием для добычи нефти. УЭЦН оснащено более 35 % всех скважин в Российской Федерации, при этом с помощью этих установок добывают более 65 % от общего объема добываемой нефти [1–4]. УЭЦН широко используют для интенсификации процесса добычи нефти [1, 3], что до недавнего времени было чрезвычайно актуально. Не стоит забывать и о преимуществах данного вида оборудования по сравнению с другими видами того же назначения [2]. УЭЦН имеют очень большой диапазон подач флюида (перекачиваемой среды) — от 10 м³/сут до 1000 м³/сут и более, способны развивать напор до 2000–3000 м. В области больших подач флюида (свыше 80 м³/сут) УЭЦН имеют самый высокий КПД среди всех механизированных способов добычи нефти, поскольку они наиболее экономичны и наименее трудоемки в обслуживании. Установки ЭЦН меньше подвержены влиянию кривизны ствола скважины. Кроме того, работа этих установок легко поддается автоматизации.

Устройство и основные элементы УЭЦН. Основными элементами исследуемой установки являются электродвигатель с гидрозащитой, газосепаратор,

электроцентробежный насос для подъема флюида из скважины, насосно-компрессорная труба, кабельная линия для подвода энергии к электродвигателю, обратный и спускной клапаны, оборудование устья скважины и трансформаторное устройство (рис. 1).

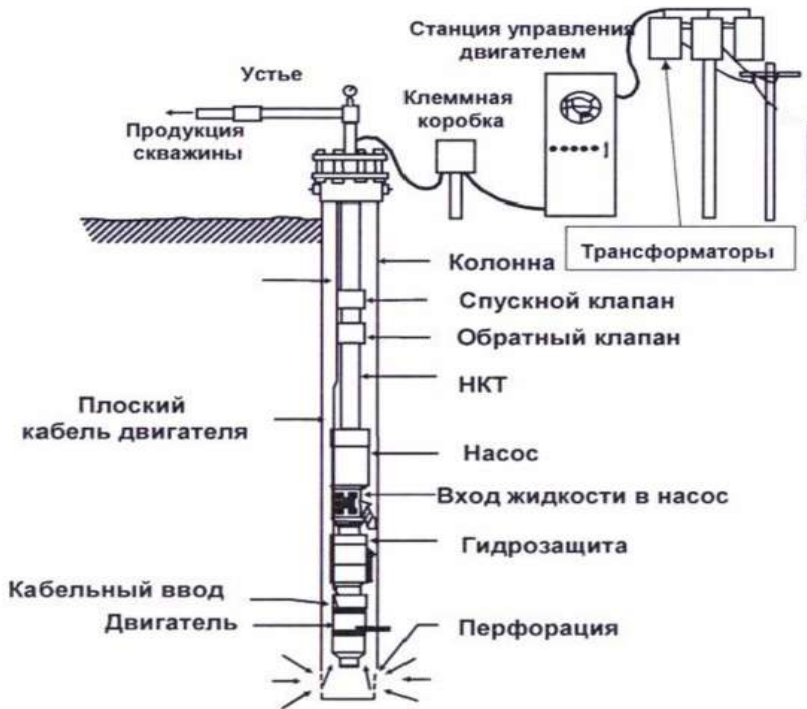


Рис. 1. Устройство и основные элементы УЭЦН

Скважинный насос является многоступенчатым и имеет от 80 до 500 и более ступеней (рабочих колес), расположенных на валу. Такое исполнение насоса принято в связи с малыми значениями напора каждой ступени, которые составляют от 3,5 до 7 м водяного столба. Эти величины напора обусловлены малым размерами рабочего колеса, которое необходимо разместить в обсадной колонне скважины. Ступени насоса работают последовательно, таким образом, в насосе суммируется напор всех ступеней, а подача насоса равна подаче одной ступени.

Жидкость поступает в насос через сетку в нижней его части. Насос подает жидкость из скважины в НКТ (насосно-компрессорные трубы). Для предотвращения попадания в двигатель пластовой жидкости имеется узел гидрозащиты. Вал двигателя соединен с валом гидрозащиты и через него с валом насоса. Электроэнергия подается к двигателю с поверхности по кабелю.

Обратный клапан позволяет при остановках насоса сохранить жидкость в колонне НКТ. Жидкость не попадает из труб в скважину, поэтому не требуется время для заполнения труб при каждой остановке насоса. Кроме того, облегчается запуск установки. Спускной клапан позволяет освободить колонну труб от жидкости перед подъемом агрегата из скважины, если в колонне установлен обратный клапан.

Эксплуатация УЭЦН. Наиболее серьезными проблемами при эксплуатации являются преждевременные отказы работы оборудования. УЭЦН работают в сложных условиях: постоянное воздействие коррозионной среды (флюида), состоящей из воды, добываемой нефти, растворенных газов, механических примесей, — не лучшим образом влияет на оборудование. Кроме того, большие экономические потери вследствие простоя снижают возможность своевременного технического обслуживания и ремонта погружного оборудования, а в случае УЭЦН большая часть элементов как раз находится в скважине. Указанные факторы объясняют, почему значение наработки на отказ по данным за 2002 год составил всего 188,2 суток [3]. Запрошедшие 15 лет этот показатель значительно вырос. Производящие УЭЦН компании называют предполагаемый срок службы около 12 месяцев. Тем не менее, значение наработки до отказа для УЭЦН является сравнительно небольшой. Хотя критерий наработки не может в полной мере отражать степень надежности оборудования [4]. Основным механизмом отказов для УЭЦН согласно [5] является износ оборудования — около 35 %, для остальных механизмов — засорения, отложения солей, отказ кабельной линии или электродвигателя — составляет не более 19 %.

Наиболее уязвимым местом в установке являются соединения. Конструкция НКТ и насоса подразумевает наличие отдельных секций, которые соединены между собой резьбой (для НКТ) или фланцевыми соединениями (для секций насоса). Насос делают секционным, чтобы обеспечить возможность взаимозаменяемости, облегчения ремонта путем замены отдельных секций. Длина секций ограничена. Например, компания «Римера» изготавливает секции длиной от 1 до 5,5 м. Секции соединяются по типу «фланец-фланец» или «фланец-корпус». Именно эти соединения являются основной причиной «полетов» УЭЦН — критических отказов с полным расчленением секций. Это подтверждают цифры, полученные при исследованиях причин отказов УЭЦН. Например, по данным 2002 года 52 % «полетов» происходит по причине разрушения фланцевого соединения между секциями [3].

Существует термин, который используют для такого типа отказов — РС-отказ, что дословно означает «расчленение секций». Однако РС-отказы описывают не только разрушение фланцевых соединений. Теоретически разрушение может произойти в любом сечении, в том числе и по корпусу насоса, который представляет собой трубу. Согласно [3, 6] к РС-отказам относят следующие виды разрушений:

- отворот ловильной головки;
- расчленение НКТ по резьбе;
- слом верхнего фланца погружного электродвигателя (ПЭД);
- слом по корпусу протектора;
- отворот основания компенсатора;
- слом по корпусу компенсатора;
- отворот основания ПЭД;
- слом по корпусу приемного модуля;

- слом по корпусу газосепаратора;
- отворот основания ЭЦН;
- слом нижней шейки ЭЦН;
- слом по корпусу ЭЦН;
- слом головки ЭЦН;
- расчленение соединений секций ЭЦН.

При этом только расчленение соединений секций ЭЦН называют «истинными РС-отказами». Именно такие отказы являются наиболее частыми — 29 % от общего числа РС-отказов (рис. 2).



Рис. 2. Виды и соотношение РС-отказов при работе УЭЦН

Снизить ущерб от таких отказов, то есть предотвратить именно сам «полет», можно, установив противоположную муфту. Согласно каталогу компании «Римера», такой элемент устанавливается на соединениях «фланец-фланец» и удерживает отсоединенную часть установки за тарелку фланца в случае разрушения соединения. Хотя эта мера позволяет снизить потери, полностью избежать их не удастся, поскольку работоспособность установки с расчлененными соединениями невозможна.

Фланцевые соединения секций УЭЦН. Существует несколько государственных стандартов конструкции фланцев. Однако специальных стандартов для фланцев соединений секций ЭЦН нет. Так, ГОСТ Р 54432–2011, «Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на номинальное давление от $PN1$ до $PN200$. Конструкция, размеры и общие технические требования» (наиболее общий стандарт, который возможно применить в рассматриваемом случае) определяет типы фланцев, их конструкцию и размеры. В случае погружного оборудования применение обычных фланцев сопряжено с некоторыми трудностями. Во время бурения скважину оборудуют обсадными колоннами, внутренние диаметры которых имеют определенные значения (112, 122, 130, 144, 146 мм). Наибольший диаметр фланца определяется внутренним диамет-

ром обсадной колонны. Фланцы, обеспечивающие свободный проход перекачиваемой жидкости, имеют габаритные размеры, превышающие значение внутреннего диаметра обсадной колонны. Поэтому в УЭЦН применяют фланцы особых конструкций, которые разрабатываются производителями насосов для конкретного насоса и скважины.

Большинство расчетов в нефтегазовой промышленности стандартизировано. Эти стандарты активно используют при проектировании, например, оборудования нефтегазопереработки, колонного оборудования. Однако для фланцевых соединений секций УЭЦН государственные стандарты (или другие виды стандартов) для расчета отсутствуют. Кроме того, отсутствуют даже упоминания о расчете фланцевых соединениях, в том числе в популярных учебных пособиях, посвященным установкам добычи нефти. Вероятно, это связано с довольно простой их конструкцией или малой значимостью этого элемента в рамках целой установки ЭЦН. Причины отсутствия широкодоступной информации по этому вопросу не столь важны, важно, что установки довольно быстро выходят из строя, в том числе по причине недостаточной надежности фланцевых соединений.

Ввиду отсутствия специальных стандартов для расчета фланцевых соединений секций УЭЦН используют наиболее подходящий из существующих документ — ГОСТ Р 52857.4–2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений». Согласно условиям применимости настоящего стандарта, его используют при расчетах фланцевых соединений сосудов и аппаратов нефтехимической, нефтеперерабатывающей и смежных областей промышленности. Однако стандарт также возможно использовать применительно к соединениям трубопроводов. Отметим, что с некоторыми оговорками ЭЦН можно считать трубопроводом. Для расчета по указанному стандарту в качестве начальных условий задаются конструкцией и исполнителем самого фланцевого соединения, а также нагрузками, которые действуют на соединение — давлением, осевой силой и изгибающим моментом. Согласно требованиям к установке УЭЦН насос должен располагаться непременно в прямолинейном участке скважины во избежание действия изгибающего момента. В таком случае на фланцевое соединение будет действовать внутреннее давление столба жидкости, расположенного выше этого соединения (фактически высота этого столба сопоставима с глубиной скважины), а также растягивающая осевая сила веса оборудования, расположенного ниже соединения. Расчет по данному стандарту производится для постоянных (наиболее значительных) нагрузок. Стоит заметить, что расчет на малоцикловой усталости также проводят, при этом размах колебаний нагрузок подбирают определенным образом, исходя из постоянных заданных в начале проведения расчетов значениям. Однако итоговым результатом (в том числе и статического) является только подтверждение или опровержение выполнения условия прочности, основанное не только на принятых принципах расчета сопротивления материалов и деталей машин, но значительном количестве экспериментальных коэффициентов. Указанные факторы не позволяют судить о степени надежности соединения.

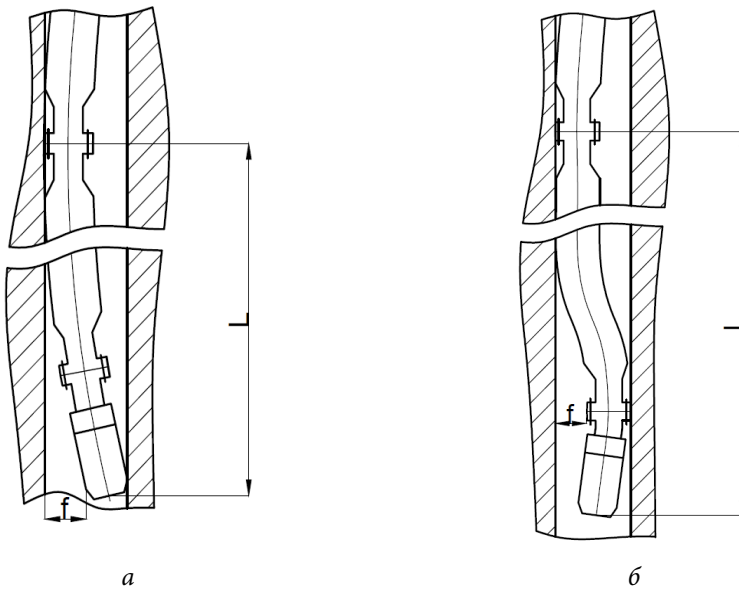


Рис. 3. Наиболее вероятное (а) и менее вероятное (б) изогнутые положения оборудования в скважине:

L — высота столба; f — растягивающая осевая сила

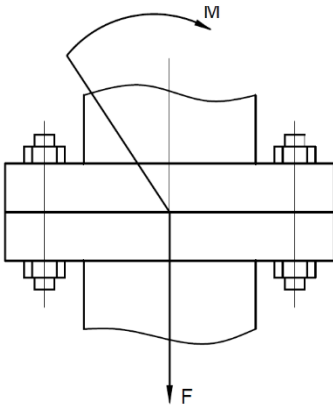


Рис. 4. Нагрузки на фланцевое соединение УЭЦН:

F — осевая сила; M — изгибающий момент

Учитывая, что стандарт предусматривает расчет фланцевого соединения при постоянных нагрузках, а в действительности такой механизм реализуется крайне редко, в том числе в случае УЭЦН, где электродвигатель вращает сотни рабочих колес, а насос расположен глубоко под землей вне доступа качественного контроля ситуации, определено направление исследования с целью повышения надежности описываемых объектов. В частности, выявлена возможность появления нерегистрируемого и случайного изгибающего момента, действующего на фланцевые соединения секций насоса. Между

наружным диаметром насоса и внутренним диаметром обсадной колонны имеется зазор, обеспечивающий размещение насоса в скважине. Под влиянием различных внешних факторов (например, возможный дисбаланс вала насоса, случайное движение среды в обсадной колонне) насос может отклониться от идеального, концентричного с обсадной колонной, положения и занять другое, менее благоприятное в рамках рассмотрения напряженного состояния. Такие положения УЭЦН представлены на рис. 3 (соотношение размеров показано условно). В таких положениях, кроме указанных выше давления и осевой силы, действие оказывает изгибающий момент, направление которого может изменяться (рис. 4).

При предварительной оценке действующего изгибающего момента будем считать, что насос представляет собой консольно закрепленную балку (см. рис. 3, а). При этом изгибающий момент определяем как изгибающий момент в заделке изогнутой консольно закрепленной балки. Предварительно перемещение свободного конца балки принимаем равным разнице наружного диаметра насоса и внутреннего диаметра обсадной колонны, а длину балки — длине насоса.

С учетом полученного изгибающего момента (переменной нагрузки) можно получить амплитудное значение напряжения во фланцевом соединении согласно традиционному подходу [7] (среднее значение напряжения определяется при действии постоянных нагрузок). При этом частоту колебаний изгибающего момента можно связывать с собственной частотой конструкции или с частотой вращения двигателя. Частота вращения двигателя более предпочтительна, поскольку значительно больше собственной частоты конструкции, следовательно, расчет обеспечивает больший коэффициент запаса. Приняв во внимание характеристики материала, с учетом среднего и амплитудного значений напряжений по диаграмме предельных амплитуд можно оценить запас прочности при переменных нагрузках.

Таким образом, учитывая дополнительные случайные и неучтенные в применяемом стандарте факторы, действующие на фланцевые соединения между секциями УЭЦН для расчета, а также при необходимости изменяя конструкцию фланцевого соединения, предполагается обеспечить большую надежность рассматриваемого элемента, что наверняка скажется на снижении числа отказов УЭЦН вследствие неработоспособности фланцевых соединений его секций.

Литература

- [1] Ивановский В.Н., Пекин С.С., Сабиров А.Л. *Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти*. Москва, Нефть и газ, 2002. 256 с.
- [2] Ивановский В.Н., Сазонов Ю.А., Сабиров А.А., Соколов Н.Н., Донской Ю.А. О некоторых перспективных путях развития УЭЦН. *Территория нефтегаз*, 2008, № 5, с. 24–33.
- [3] Чукчеев О.А., Рублев А.Б., Сушков В.В. Оценка технического состояния погружных установок электроцентробежных насосов на специализированных стендах. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*, 2002, № 6, с. 49–52.
- [4] Захаров М.Н. *Основы теории надёжности оборудования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 94 с.
- [5] Мельниченко В.Е. Подходы к определению причин снижения надежности УЭЦН. *Бурение и нефть*, 2017, № 2, с. 16–21.
- [6] Ишмурзин А.А., Пономарев Р.Н. Зависимость аварийных отказов установок погружных центробежных насосов от времени работы в скважине. *Нефтегазовое дело*, 2006, № 2. URL: http://ogbus.ru/authors/Ishmurzin/Ishmurzin_5.pdf.
- [7] Ряховский О.А., ред. *Детали машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 465 с.

Иваныкина Виктория Владиславовна — магистрант кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — М.Н. Захаров, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

RELIABILITY ANALYSIS AND SPECIFIC CHARACTER OF CALCULATING FLANGE CONNECTIONS OF THE SECTIONS OF SUBMERSIBLE PUMPS

V.V. Ivanykina

viktory.ivanykina@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study tested flange connections of the sections of electrical submersible pumps and investigated the features of electrical submersible pumps for oil production. We determined the indicators of their reliability and analyzed the nature and failure causes of the equipment. We found that the reason for such failures as breaking up of the equipment sections in more than 30 % of cases is the break in flange connections of the sections. Moreover, we studied the problems of application and design of flange connections used for connecting the sections of an electric submersible pump. We revealed the possibility of additional loads that are not taken into account in the standard calculation and found that in the case of strength calculation of flange connections, it is necessary to additionally take into consideration the variable bending moment, which is caused by the arbitrary bending of the pump in the zone limited by the casing column.

Keywords

Flange connections of sections, electrical submersible pump, reliability indicators, variable bending moment, strength calculation

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Ivanovskiy V.N., Pekin S.S., Sabirov A.L. Ustanovki pogruzhnykh tsentrobezhnykh nasosov dlya dobychi nefi [Borehole pump sets for oil output]. Moscow, Neft' i gaz publ., 2002. 256 p.
- [2] Ivanovskiy V.N., Sazonov Yu.A., Sabirov A.A., Sokolov N.N., Donskoy Yu.A. On some prospective ways of ESP development. *Territoriya neftegaz* [Oil and Gas Territory], 2008, no. 5, pp. 24–33.
- [3] Chukcheev O.A., Rublev A.B., Sushkov V.V. Technical condition assessment of electric-centrifugal pump immersible sets on specialized stands. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz* [Higher Educational Institutions News. Oil and Gas], 2002, no. 6, pp. 49–52.
- [4] Zakharov M.N. Osnovy teorii nadezhnosti oborudovaniya [Fundamentals of equipment reliability theory]. Moscow, Bauman Press, 2009. 94 p.
- [5] Mel'nichenko V.E. Approaches to determining the reasons for the reduced reliability of ESP. *Burenie i nefi*, 2017, no. 2, pp. 16–21.
- [6] Ishmurzin A.A., Ponomarev R.N. Dependence of immersible electric-centrifugal pump sets emergency failure on operating time in the hole. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2006, no. 2. Available at: http://ogbus.ru/authors/Ishmurzin/Ishmurzin_5.pdf.
- [7] Ryakhovskiy O.A., ed. Detali mashin [Machinery parts]. Moscow, Bauman Press, 2014. 465 p.

Ivanykina V.V. — Master's Degree student, Department of Machine Construction Principles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — M.N. Zakharov, Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Machine Construction Principles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.