

**Аннотация.** В статье приведено описание экспериментального лабораторного стенда динамических испытаний ступеней погружных центробежных электронасосов (ЭЦН). Стенд предназначен для исследования рабочих и вибрационных характеристик ступеней ЭЦН. Создание стенда связано с появлением большого количества аварий типа «полет» насосных агрегатов модульного исполнения, получивших массовое применение на нефтяных промыслах. Главная задача работы на стенде определить, какая составляющая часть насосного агрегата вызывает резкое повышение вибрации всей насосной установки.

**Введение.** Более 90% нефти нынешние нефтяные компании Западной Сибири добывают с помощью УЭЦН, которые занимают более 2/3 от общей структуры эксплуатационного фонда скважин.

Процесс добычи сопряжен с большим количеством осложняющих факторов, влияющих на работу УЭЦН. В условиях постоянного процесса оптимизации нефтедобычи погружное оборудование приходится эксплуатировать в жестких условиях: вынос мексримесей, изменение температурного режима, работа на большой глубине, высокая минерализация пластовых вод, работа в наклоннонаправленных скважинах. Все это влечёт за собой соедоложения, повышенный износ оборудования и его механических узлов, высокие уровни вибрации, большие скорости коррозии, и как следствие, преждевременные отказы.

В настоящее время на рынке погружных центробежных электронасосов для добычи нефти (УЭЦН) складывается тенденция увеличения спроса на насосы для разработки малорасходных нефтяных скважин, перекачивающих 10 – 130 м<sup>3</sup>/сут. пластовой жидкости.

Несмотря на явные преимущества УЭЦН имеют и серьезные недостатки. Погружные двигатели асинхронного типа для привода ЭЦН имеют высокие токи при пуске, что значительно разогревает корпус во время пуска и неблагоприятно действует на всю систему: рывок при включении вызывает дополнительную нагрузку на все межсекционные соединения, разогрев корпуса увеличивает температуру среды, проходящей в насос по узкой кольцевой щели мимо двигателя, что провоцирует изменение реологических свойств жидкости и выделение-увеличение газовых пузырьков, попадающих в насос. Возможны случаи, когда двигатель и часть насосных секций лежат на эксплуатационной колонне в искривленной части скважины, что может провоцировать ударную вибрацию и повышенную вибрацию от касания с колонной.

Остается нерешенной проблема методики точного подбора насосного агрегата к конкретной скважине из-за конечных параметров двигателя и насосной части, т.е. подбор осуществляется приблизительно, что отрицательно влияет на работу скважины и насосного агрегата. В настоящее время уже созданы прикладные программы для этой цели, интеллектуальные скважины, станции управления с регулированием частоты вращения валов насоса для подстройки подачи насоса под дебит скважины, но такого оборудования недостаточно для полного переноса, и является дорогостоящим.

Все перечисленные проблемы требуют совершенствования оборудования массового выпуска, потребительский уровень которого можно поднять модернизацией отдельных узлов, снижением величины вибрации и формированием специальных комплексов из серийно выпускаемого оборудования и комплектующих, в том числе различных производителей.

**Материал и методика исследования.** Сформулируем задачи, решаемые подбором комплектующих деталей и узлов основных производителей, предприятий, занимающихся разработкой и выпуском комплектующих для специальных условий работы и осложненных условий, а также специалистов и изобретателей.

Особо актуально: соедоложения, коррозия и обводненность. Проблема решается, в некоторых случаях частично, применением специальных полимерных покрытий внутренних поверхностей и проточной части насосных секций и входного модуля.

Применение специальных устройств для предупреждения образования эмульсий и снижения влияния соедоложения и парафиноотложений. Деземальгаторы и ингибиторы в специальных контейнерах.

Борьба с вибрацией. Снижение массы вращающихся деталей, повышение качества вращающихся деталей, качества поверхностей, проточных каналов. Применение деталей из полимеров, специальные «скользящие покрытия».

Разработка высоконапорных ступеней для снижения общей длины насосной установки, что приводит к дополнительному снижению вибрации и ее влияния на перекачиваемую жидкость. Появится возможность эксплуатации в искривленных скважинах.

Применение современных станций управления с частотным регулированием и телеметрий, радиомодемной связью совместно с применением погружных винтовых электродвигателей малых габаритов с возможностью плавного пуска.

Ведущие исследователи всего мира сталкиваются проблемами эксплуатации погружных центробежных электронасосов, опубликовано большое количество книг и статей [1-7], посвященных этой теме.

В конце 80-х, начале 90-х годов сотрудники кафедры «Машин и оборудования нефтяных и газовых промыслов» Тюменского индустриального института совместно со специалистами ЦБПО НПО Г. Нефтеюганска занимались вопросами создания стенового оборудования для обкатки и испытания погружного оборудования ЭЦН, а также его технического диагностирования, что было связано с появлением новых отказов погружного оборудования – «полетов» [8].

Эта работа завершилась внедрением вибриодиагностики ЭЦН на предприятиях и разработкой методики диагностирования погружных электродвигателей (ПЭД), основанной на снятии частотной характеристики спектра вибрации «анализатором машинного оборудования» модели 2110 производства американской фирмы CSI совместно с программным обеспечением Master Trend [9]. Расшифровка полученных частотных характеристик производилась на основании методики, разработанной в ЦБПО НПО.

Продолжением этой работы явилось создание стенда для динамических испытаний погружных центробежных электронасосов [10, 11] и его лабораторной модификации, позже запатентованной [12].

Изменения в конструкции стенда были обусловлены следующими требованиями:

- расположение стенового оборудования в помещении без заглубления под уровень пола;
- компактность;
- доступность ко всем узлам насосной установки;
- высокая монтажеспособность;
- возможность закрепления вибродатчиков в любом месте насосной установки.

Исходя из перечисленных требований, были внесены изменения в конструкцию насосного агрегата: применен электродвигатель обычного исполнения; подвод жидкости к входному модулю осуществляется с помощью специального устройства, расположенного выше электродвигателя. Рабочая и мерная емкости установлены на подставках, для обеспечения залива жидкости и заполнения насоса самотеком.

Модернизированный лабораторный испытательный стенд обеспечивает:

- получение рабочих гидравлических и энергетических характеристик насоса на воде при вертикальном расположении насосного агрегата с одновременным снятием вибрационных характеристик;
- получение вибрационных характеристик отдельных составных частей насосного агрегата;
- возможность получения рабочих характеристик всех серийно выпускаемых ступеней ЭЦН типоразмера 5;
- возможность доступа к механической части насоса и входного модуля с целью исследования различных конструктивных решений, снижающих величину вибрации агрегата.

Целью лабораторных исследований являются:

- исследование влияния качества сборки и оценка влияния сборочных единиц насосного агрегата на общую картину вибрации;
- исследование влияния режима работы насоса на его вибрационную характеристику;
- исследование влияния величины износа подшипников насоса на его гидравлическую характеристику;
- исследование влияния величины износа рабочих органов насоса на его вибрационную характеристику;
- исследование резонансных явлений при изменении режимов работы насоса.

Лабораторный испытательный стенд представляет собой комплекс оборудования, расположенный внутри помещения, стенд имеет замкнутую гидравлическую схему, все виды испытаний проводятся на чистой пресной воде. В состав лабораторного испытательного стенда (рис.1) входят следующие оборудование, объединенное в блоки: рабочая емкость 1, мерная емкость 2, блок насосного агрегата, включающий насос 6, приемный узел 7 и электродвигатель 8, замерный участок трубопровода с расходомером 4 и фильтром 5, нагнетательный и всасывающий трубопроводы с запорными устройствами 3, пульт управления и блок измерительных приборов 9.

В плане проведения эксперимента предполагалось получение напорной и энергетической характеристик, а также снятие вибрационной характеристики насосного агрегата, что соответствует категории параметрических испытаний.

Эксперимент по исследованию вибрации насосного агрегата на лабораторном испытательном стенде проводился в несколько этапов, каждый из которых являлся законченной составной частью эксперимента со своей целью, задачами и методикой проведения.

В связи с увеличением количества аварий типа «полет» у агрегатов модульного исполнения (ЭЦНМ) была сделана попытка выяснить, какой узел насосного агрегата вносит наибольшую долю вибрации при работе всего оборудования в сборе.

В соответствии с этим, первым этапом эксперимента явился следующий: исследование вибрации составных частей насосного агрегата с целью определения влияния качества сборки и его отдельных составных частей на общую величину вибрации агрегата, оценка доли каждой составной части в общей картине вибрации насосного агрегата [13].

Первый этап эксперимента проводился в следующем порядке в виде отдельных законченных опытов.

Опыт 1. Электродвигатель насосного агрегата, установленный на раме-стойке в вертикальном положении обследовался как вибрирующий механизм. Целью опыта являлось нахождение характеристических точек – точек с максимальным значением параметра вибрации. В качестве измерителя величины вибрации использовался лабораторный измеритель шума и вибрации ПВ8-003 с пьезоэлектрическим широкополосным вибропреобразователем ДН-4. В результате опыта выделены две точки с максимальным значением виброускорения, подготовлены площадки для жесткой установки пьезоэлектрических вибропреобразователей на резьбовых шпильках при измерении вибрации в радиальном и осевом направлениях. За основной параметр вибрации принята величина виброускорения, как параметр с величиной прямо пропорциональной величине электрического сигнала на выходе вибропреобразователя.

Опыт 2. Определение влияния серийного входного модуля как сборочной единицы, на величину вибрации электродвигателя.

На электродвигатель, расположенный вертикально, смонтирован доработанный входной модуль МБ5А серийного насосного агрегата ЭЦНМ. Доработка заключалась в отбросе верхней части корпуса модуля до исчезновения дырки для последующей установки герметизирующего кольца устройства подвода жидкости. Целью опыта – определение влияния входного модуля на общую картину вибрации электродвигателя – входной модуль. С учетом того, что этот этап исследований проводился на воздухе, предварительно втулки подшипников модуля были смазаны маслом.

Опыт 3. Определение влияния корпусной детали устройства подвода жидкости на величину вибрации сборки.

На электродвигатель в сборе с входным модулем, расположенный вертикально, смонтировано устройство подвода жидкости. Целью опыта – определение влияния этого устройства на величину вибрации.

Опыт 4. Определение влияния мерной емкости на величину вибрации сборки.

На сборку, описанную выше, установленная серийная шпильная муфта для соединения валов входного модуля и насоса. Опыт проводился с целью выявления влияния вращающейся шпильной муфты, имеющей значительную массу и устанавливаемую с известным насосом, на величину вибрации сборки.

Опыт 5. Определение влияния насоса с минимальными радиальными муфтами на величину вибрации сборки.

К сборке, состоящей из электродвигателя, входного модуля с устройством подвода жидкости и шпильной муфты, присоединена насосная секция. Исследования проводились для насосной секции типоразмера 5, с 10 ступенями ЭЦНБ-80, производительность 80 м<sup>3</sup>/сут. Для оценки величины вибрации, при вращении ротора насоса на воздухе были проведены исследования, аналогичные опытам 4-6, с учетом условий проведения опыта, подшипниковые узлы и защитные втулки вала были смазаны в процессе сборки насосной секции.

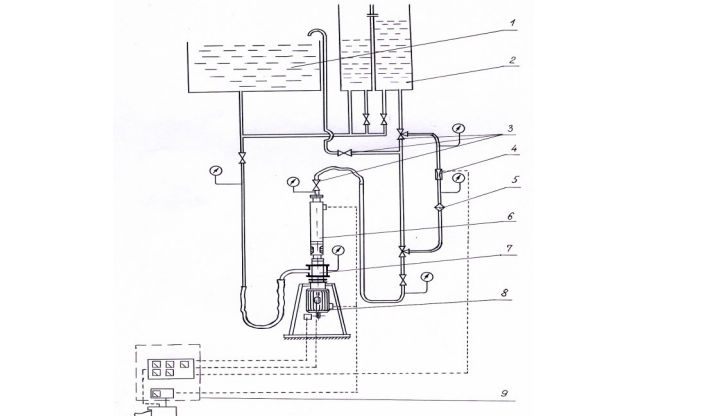


РИСУНОК 1. Лабораторный испытательный стенд

**Результаты испытаний.** Результаты приведены в виде линейной гистограммы, показывающей изменение величины виброускорения при добавлении к электродвигателю сборочных единиц, составляющих насосный агрегат (рисунк 2).

Исследование вибрационных характеристик выполнялось в диапазоне частот 10-8000 Гц с раздельным измерением радиальной и осевой вибрации, при этом были определены наиболее чувствительные точки, как по длине агрегата, так и в поперечном сечении, которые были выбраны для крепления вибродатчиков в дальнейших исследованиях.

Измерение виброхарактеристики входного модуля на воздухе показало, что радиальное виброускорение сборки увеличивается на 23 %, а осевое – более чем в два раза (106 %). При испытаниях на воде радиальное виброускорение находится в пределах 5,8 м/с<sup>2</sup>, а осевая вибрация по сравнению с радиальной увеличилась в 2,8 раза.

Исследования, проведенные через некоторое время на том же испытательном лабораторном стенде, велось с целью отработки методики измерений с помощью шифровой аппаратуры нового поколения и подтверждения результатов исследования влияния качества изготовления и сборки отдельных узлов насосного агрегата на вибрационную характеристику на измерительной технике, в настоящее время считающейся морально устаревшей.

Для контроля вибропараметров использовалось синхронный 8-канальный спектроанализатор Атлант-8. Эксперимент заключался в определении влияния состава сборочных единиц насосного агрегата на параметры вибрации и с учетом спектрального состава вибрации. За основу взята система измерений, опробованная с аналоговыми приборами [13]. За основной параметр вибрации было выбрано виброускорение, измеряемое в радиальном и осевом направлениях по отношению к валу насосной установки.

Исследования проводились в соответствии с программой предыдущего эксперимента в несколько этапов, заключающихся в снятии вибрационной характеристики работающего агрегата без жидкости в различном составе, начиная с электродвигателя, закрепленного на подвеске, позволяющей имитировать положение агрегата в наклоннонаправленной скважине.

Результаты исследований подтвердили полученные ранее общие закономерности [14].

Результатом исследований явились вибрационные характеристики насосного агрегата для всех этапов эксперимента. Программное обеспечение синхронизатора Атлант позволяет получить любые параметры вибрации и обработать их в соответствии с требованиями современного спектрального анализа, на рис.2 приведены спектры осевого виброускорения для каждого этапа эксперимента, выстроенные синфазно. Спектральный состав сильно зависит от включенного в сборку оборудования, отдельные гармоники сглаживаются или пропадают при изменении состава сборки.

Исследования показали, что главным источником повышенной вибрации модульного насосного агрегата является конструкция входного модуля, который вызывает увеличение радиальной вибрации сборки на 23 %, а осевой вибрации на 106 %. Таким образом, осевая вибрация по сравнению с радиальной от входного модуля увеличивается в 2,8 раза.

Проведенные далее исследования показали: изменение подачи и напора на воде для серийных ступеней ЭЦН-80 показало, что радиальная и осевая вибрация незначительно зависят от подачи и напора, создаваемого насосом. Так, изменение радиальной вибрации находится в пределах 10 % и осевой 20 %, наблюдаемой только в области оптимальной подачи.

Износ радиальных опор в насосе в пределах от минимального до предельно допустимого не оказывает существенного влияния на осевую вибрацию, изменяющуюся в пределах не более 13 % при этом радиальная вибрация возросла на 44 %.

Проведенные измерения виброхарактеристик насоса с новыми и изношенными деталями на разных режимах работы выявили следующие закономерности: характер колебаний не соответствует линейности системы, т.к. периодическое воздействие не вызвало периодического отклика; в многочисленных экспериментах не наблюдались резонансные явления; квазипериодические сигналы прерывались случайными выбросами, такое поведение обычно свойственно для нелинейных систем в режиме приближения к хаотическим колебаниям. Об этом же может свидетельствовать появление высо-ких гармоник (субгармоник) в спектре сигнала.

Существующая теория линейной зависимости величины вибрации от износа не объясняет результаты экспериментальных исследований [13,14].

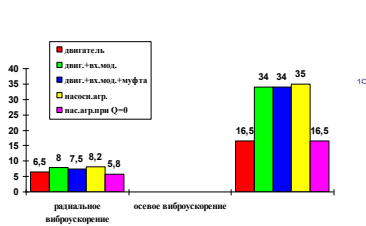


РИСУНОК 2. Влияние узлов насосного агрегата на величину виброускорения, м/с<sup>2</sup>

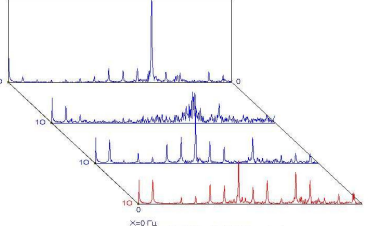


РИСУНОК 3. Изменение спектральных характеристик на стадии сборки насосного агрегата

Литература

Каплан Л.С., Семенов А.В., Разгонов Н.Ф. Эксплуатация осложненных скважин центробежными электронасосами. - М.: Недра, 1994. - 190 с.

Кибирев Е.А. Опыт эксплуатации и ремонта УЭЦН в ЦБПО НПО АО «Юганск-нефтегаз». Химическое и нефтегазовое машиностроение №3, 1998, с.17-20.

Grande C.M., Patterson M. Device protects ESPs from lightning strikes, other anomalies./World Oil - 1992, IV - vol. 213, № 4 - P.55- 57.

Lee J.F., Winkler H.W. What's new in artificial lift./World oil. - 1992, IV-Vol.213, № 4. - P.41- 44

Ditman W.J., Marino A.W., Jones K.L. ESPs add production capacity to deep,hot, and gassy. California wells// Oil and Gas J.- 1992,24/VIII - vol.90,№ 34. - P. 47- 50.

Durham M.O. Effect of vibration on ESP failures// J. Of Petrol Technol.-1990. -vol.42, № 2. - P. 186-190.

Лит С., Эллисон А. Измерение шума машин: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 144 с.

Кибирев Е.А. Опыт эксплуатации и ремонта УЭЦН в ЦБПО НПО АО «Юганск-нефтегаз». Химическое и нефтегазовое машиностроение №3, 1998, с.17-20.

Функции и применение системы «Master Trend». Программное обеспечение CSI для обслуживания оборудования по фактическому состоянию. Каталог CSI «Master Trend». - 73 с.

В.В. Петрухин, В.Ф. Бочарников. Лабораторное исследование вибрации ступеней погружных центробежных электронасосов для добычи нефти // Научно-технические проблемы Западно-Сибирского нефтегазового комплекса: сб. науч. трудов. том 2. - Тюмень: ТюмГНГУ, 1997. - С. 11-16

В.В.Петрухин, В.Ф.Бочарников. Стенд для испытания ступеней ЭЦН // Проблемы разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири: сб. науч. трудов. - Тюмень: ТюмНИИ, 1994. - С. 120

Стенд для динамических испытаний насосов: пат. RU2140573 Рос. Федерация / В.Ф. Бочарников, В.В. Петрухин / ТюмН-ГУ. - № 97107934/06; заявл. 13.05.1997; опубл. 27.10.99. Бюл. № 30 - 3 с.

Петрухин В.В. Исследование и разработка мероприятий по повышению эффективности эксплуатации погружных центробежных электронасосов для добычи нефти: дис. ... канд. техн. наук. : 05.15.06. - Тюмень, 2000. - 229 с.

Петрухин С.В. Исследование и разработка технических и технологических решений повышения производительности работы нефтяных скважин: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.17. - Уфа, 2013. - 150 с.