

УДК 622.323:621.65

**В.Н. Ивановский**<sup>1</sup>, e-mail: ivanovskiyvn@yandex.ru

<sup>1</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (Москва, Россия).

## Оптимизация компоновок электроприводных лопастных насосов

Эксплуатация нефтяных месторождений в осложненных условиях требует использования все более сложных детерминированных конструкций оборудования для добычи. Следствием этого является увеличение стоимости самого оборудования, а также рост затрат на его разработку, изготовление, испытание, хранение, обслуживание и ремонт. Для снижения совокупной стоимости владения нефтедобывающим оборудованием, в том числе установками электроприводных лопастных насосов, необходимо использовать оптимизированные типоразмерные ряды оборудования. В то же время должна быть предусмотрена возможность модификации оборудования каждого представителя типоразмерного ряда в целях обеспечения максимальной эффективности добычи нефти в определенных условиях эксплуатации. Так, основные элементы установок электроприводных лопастных насосов могут быть модифицированы с помощью ряда конструктивных и технологических приемов. Однако для этого необходимо обеспечить научно обоснованные, экономически оправданные и узаконенные методики компоновки электроприводного насоса и всей установки в целом.

В статье представлены некоторые направления и обоснование методики компоновки, связанные с выбором типа ступеней, материала для их изготовления, конструкции радиальных подшипников и типа сборки электроприводных лопастных насосов.

Проанализированы используемые в настоящее время конструкции ступеней, радиальных подшипников и типов сборки насосов, представлены оптимальные области применения различных вариантов основных узлов и электроприводных лопастных насосов в целом. Следование представленным рекомендациям по компоновке позволит повысить эффективность добычи нефти с помощью установок электроприводных лопастных насосов в осложненных условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** электроприводной лопастной насос, конструкция ступеней, материал ступеней, конструкция подшипников, тип сборки насосов, компоновка насоса.

.....

**V.N. Ivanovskiy**<sup>1</sup>, e-mail: ivanovskiyvn@yandex.ru

<sup>1</sup> National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Moscow, Russia).

## Optimization of Electrical Submersible Centrifugal Pumps Design

Operation of oil and gas fields in complicated environment requires the use of increasingly sophisticated deterministic designs for production equipment. As a result the cost of such equipment goes higher, as well as the expenses for its development, manufacture, testing, storage, service and maintenance. To cut the aggregate ownership cost for the oil producing equipment, including electrically driven vane pumping units, it is necessary to use a family of optimized standard sized equipment. Along with this, there should be provisions for the modification of every representative model of the standard sized equipment to ensure maximum efficiency of oil production under specific operating mode. Thus, the basic elements of electrically driven vane pumping units can be modified using a number of design and engineering techniques. But this requires the availability of science-based, economically feasible and legal assembling procedures of an electrically driven pump and the entire unit.

The article presents some trends and assembling procedures related to the choice of stage types, manufacturing materials, designs of radial bearings, and the assembly type for electrically driven vane pumps. The article analyzes current designs for stages, radial bearings, and assembly types for pumps. It also gives optimal applications of various options for basic components and electrically driven vane pumps as a whole.

The use of recommendations presented in the article for the assembling procedure will make it possible to increase oil production efficiency using electrically driven vane pumping units in complicated operating environment.

**Keywords:** electrical submersible centrifugal pump, design of stages, material of stages, bearing design, type of pump assembling, configuration of the pump.

Эксплуатация нефтяных месторождений в осложненных условиях требует использования все более сложных детерминированных конструкций оборудования для добычи. При этом увеличиваются не только стоимость оборудования, но и затраты на его разработку, изготовление, испытание, хранение, обслуживание и ремонт. В целях уменьшения совокупной стоимости владения нефтедобывающим оборудованием, в частности установками электроприводных лопастных насосов (УЭЛН) (для обозначения этого оборудования чаще всего используется термин «установки электроприводных центробежных насосов» (УЭЦН), однако в статье будет использоваться аббревиатура УЭЛН в соответствии с [1]), необходимо использовать оптимизированные типоразмерные ряды оборудования [2]. При этом для каждого представителя типоразмерного ряда может и должна быть осуществлена возможность модификации узлов и деталей оборудования, обеспечивающих максимальную эффективность добычи нефти в определенных условиях эксплуатации. Применительно к УЭЛН такая модификация может быть осуществлена, например, для соответствия выпускаемого оборудования Единым техническим требованиям (ЕТТ) той или иной нефтяной компании. В то же время оборудование должно отвечать всем требованиям ГОСТ, РД, регламентов типоразмерного ряда, в частности должен быть соблюден уровень основного рабочего параметра: подачи в номинальном режиме, отклонения значения подачи в номинальном режиме от значения подачи в оптимальном режиме, геометрических размеров, параметров откачиваемого флюида и т. д. Для обеспечения этих показателей основные элементы УЭЛН могут быть модифицированы с помощью конструктивных и технологических приемов. Например, для увеличения максимально допустимого содержания свободного газа на приеме лопастного (центробежного) насоса могут применяться

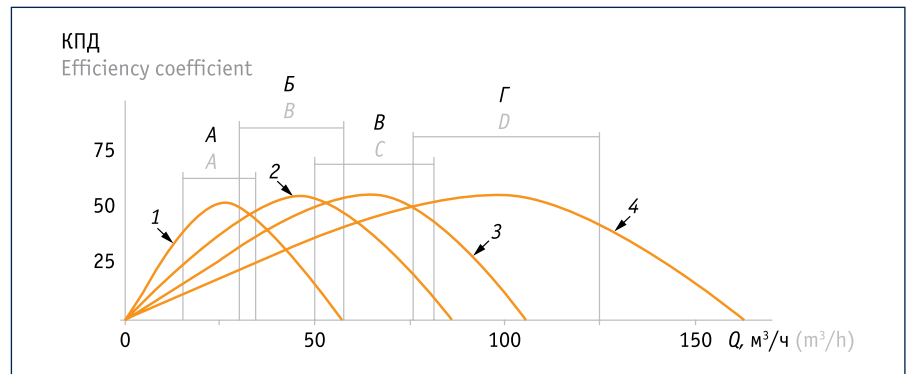


Рис. 1. Энергетические характеристики ступеней параметрического ряда:

1 – характеристика Э-25; 2 – характеристика Э-40; 3 – характеристика Э-63; 4 – характеристика Э-100; А – рабочие части характеристик Э-25; В – рабочие части характеристик Э-40; В – рабочие части характеристик Э-63; Г – рабочие части характеристик Э-100

Fig. 1. Power characteristic of stages of parameters series; 1 – E-25 performance; 2 – E-40 performance; 3 – E-63 performance; 4 – E-100 performance; A – E-25 operating performance; B – E-40 operating performance; C – E-63 operating performance; D – E-100 operating performance

конструктивно измененные рабочие колеса и направляющие аппараты (центробежно-вихревые рабочие колеса и соответствующие им направляющие аппараты), а может быть использован технологический прием, известный под названием «конический насос». Другим примером модификации оборудования является создание ступеней с помощью технологии МИМ (англ. Metal Injection Molding – заливка металла в форму под давлением методом впрыска) и использование конструкции ступеней с открытыми рабочими колесами. Имеющиеся разнообразные методики и компьютерные программы подбора (дизайна) оборудования по исходным промышленным данным основаны главным образом на критерии энергоэффективности. Необходимо отметить, что при прочих равных условиях (одинаковая конструкция, равные давления на приеме насоса, частоты вращения и т. д.) выбор оборудования по критерию энергоэффективности автоматически ведет к повышению наработки до отказа: оборудование работает практически в оптимальном режиме, т. е. защищено от большинства негативных воздействий, которые могут возникнуть в системе «пласт – скважина – насосная

установка». Однако в настоящее время практически не используются методики и программы, которые обеспечивают не только выбор оборудования, но и проверку показателей его надежности. В первую очередь это связано с отсутствием не инструментов определения показателей надежности [3], а научно обоснованных, экономически оправданных и узаконенных методик компоновки ЭЛН и всей установки в целом. Рассмотрим некоторые направления и обоснование такой методики компоновки, включающей выбор:

- 1) типа ступеней ЭЛН;
- 2) материала ступеней ЭЛН;
- 3) конструкции радиальных подшипников ЭЛН;
- 4) типа сборки электроприводного лопастного насоса.

#### ВЫБОР ТИПА СТУПЕНЕЙ ЭЛН

Несомненно, ступень насоса должна соответствовать дебиту скважины, т. е. оптимальный режим насоса по подаче не должен отличаться от дебита скважины по жидкости более чем на 15–25%. При этом границы рабочих частей (диапазонов) характеристик (РЧХ) предлагаемого в [1] типоразмерного ряда насосов должны перекрываться на 20–25% (рис. 1).

Для цитирования (for citation):

Ивановский В.Н. Оптимизация компоновок электроприводных лопастных насосов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 9. С. 50–61.

Ivanovskiy V.N. Optimization of Electrical Submersible Centrifugal Pumps Design. Territorija «NEFTEGAS» = Oil and Gas Territory, 2018, No. 9, P. 50–61. (In Russ.)

Такой вид РЧХ позволит обеспечить эксплуатацию УЭЛН при максимально возможном коэффициенте полезного действия (КПД) и энергоэффективную добычу нефти. Этот подход к выбору ступеней делает ненужными разработку, изготовление и активное продвижение насосов и ступеней с так называемой гибкой характеристикой (насосы серии FLEX). Действительно, для чего приобретать и внедрять этот вид оборудования, если большая часть РЧХ лежит в области крайне низких КПД? Объяснение фирм-производителей, что рабочие колеса имеют специальную конструкцию и не подвержены «всплыванию» в правой части характеристики, было бы интересно, если бы данные насосы не были насосами компрессионной сборки. Как известно, при такой сборке рабочие колеса вообще не могут «всплывать», поскольку жестко зафиксированы, что предотвращает осевое перемещение на валу.

Выбранные по подаче ступени должны соответствовать следующим критериям:

- 1) обеспечивать возможность перекачивания пластового флюида реальной скважины с максимально возможным КПД;

- 2) иметь минимальную предрасположенность к отложению солей, парафина, механических примесей;

- 3) обеспечивать эффективную работу при наличии свободного газа.

Применительно к ступеням, которые должны соответствовать первому пункту, речь должна идти не только о геометрических параметрах (диаметр входа и выхода жидкости, ширина канала на входе и выходе из колеса и направляющего аппарата, углы наклона и количество лопаток колеса и направляющего аппарата), но и о наличии или отсутствии дополнительных лопаток на заднем диске (центробежно-вихревые ступени), применении открытых или полуоткрытых рабочих колес, о конструктивных особенностях лопаток, о возможности разгрузки осевого усилия на рабочее колесо и т. д. Например, для перекачки пластового флюида, имеющего повышенную вязкость и механические примеси, но малое количество свободного газа, целесообразно применять центробежно-вихревые ступени [4].

При таких условиях работы наиболее перспективными будут ступени с полуоткрытым или открытым рабочим колесом – такая конструкция меньше подвержена засорению механическими примесями и будет иметь минимальные дисковые и гидравлические потери. И наоборот, малая вязкость жидкости и значительное количество свободного газа делают очень эффективным применение центробежно-вихревых ступеней, обладающих в этих условиях высоким КПД, повышенным напором и возможностью диспергировать газожидкостную смесь.

Использование повышенной частоты вращения вала насоса для увеличения напора ступени и снижения негативного влияния свободного газа приводит к увеличению нагрузки на опорные шайбы рабочих колес. Также при этом увеличивается скорость скольжения в осевой опоре ступени. Поэтому для таких случаев может быть рекомендовано применение рабочих колес с разгрузочными отверстиями в заднем (ведущем) диске и двухопорной конструкции ступеней.

При этом необходимо учитывать, что в ступенях с разгрузочными отверстиями увеличиваются объемные потери, а в двухопорных конструкциях ступеней стеснение входного отверстия рабочего колеса может приводить к снижению гидравлического КПД. Кроме того, ступени с разгрузочными отверстиями и с двухопорными рабочими колесами требуют намного более высокой точности изготовления.

Открытые рабочие колеса обладают существенными отличиями [5] от обычно применяемых рабочих колес ЭЛН как по конструктивным, так и по техническим параметрам. К положительным отличиям можно отнести малую монтажную высоту ступеней с открытыми рабочими колесами (меньше на 30–50 %); возможность работы без засорения механическими примесями; возможность перекачивания газожидкостных смесей с содержанием свободного газа до 55 % даже при подачах до 25 м<sup>3</sup>/сут; малую массу и высокую динамическую сбалансированность ротора насоса даже при высокой частоте вращения (до 12 000 об/мин). К недостаткам сту-

пеней с открытыми рабочими колесами относят пониженный (на 5–10 пунктов) КПД и уменьшенный напор ступени. Необходимо отметить, что снижение напора одной ступени компенсируется возможностью размещения в стандартном по длине корпусе в 1,5–2,0 раза большего количества ступеней, что позволяет повысить напорность насоса в 1,3–1,8 раза.

## ВЫБОР МАТЕРИАЛА СТУПЕНЕЙ ЭЛН

Если для изготовления рабочих колес и отводов разных типов (лопаточные направляющие аппараты, спиральные отводы, комбинированные отводы) центробежных насосов «наземного базирования» применяются различные металлические, композитные и полимерные материалы, то для скважинных ЭЛН применение конструкционных материалов ограничено несколькими вариантами. В первую очередь это связано с ограничениями, накладываемыми на технологию изготовления рабочих колес и направляющих аппаратов малого размера. Наиболее технологичными для этих целей до настоящего времени были серый чугун и полимерные материалы, позволяющие получать требуемые детали с минимальными затратами. Применение модификаторов (бора, церия, магния и т. д.) обеспечивает повышение износостойкости и литейных качеств серого чугуна, для увеличения прочности полимерных деталей используются специальные технологические приемы. В некоторых случаях основные детали – направляющие аппараты (НА) и рабочие колеса (РК) – выполняются комбинированными: корпус НА и ступица РК выполнены из никелевого чугуна, лопаточные системы и диски – из полимеров (рис. 2).

Ступени из серого чугуна имеют самую низкую стоимость изготовления



Рис. 2. Рабочие колеса из полимерных материалов

Fig. 2. Operating rotors made of polymers



Рис. 3. Износ рабочих колес ступеней электроприводного лопастного насоса из нирезиста при наличии механических примесей

Fig. 3. Wear rate of rotors of electric vane pumps stages made of Ni-resist under the presence of mechanical impurities

и успешно работают в обычных условиях эксплуатации. Полимерные (композитные) ступени хорошо зарекомендовали себя в скважинах с отложениями солей и парафина [6] из-за низкой адгезии к этим соединениям. Еще одним достоинством рабочих органов из полимеров является высокая чистота поверхности деталей, в том числе поверхности рабочих каналов РК и НА. При этом необходимо учитывать, что применение ступеней из серого чугуна невозможно в осложненных условиях эксплуатации (при высоком уровне обводненности и минерализации пластового флюида, наличии механических примесей). А применение полимерных или композитных материалов не получило достаточно широкого распространения из-за некоторых особенностей работы первого поколения ступеней из таких материалов, а также по причине низкой ремонтпригодности этих изделий.

Поэтому для работы в значительной доле фонда нефтяных скважин применяются насосные ступени из никельсодержащего чугуна (нирезиста). Ступени из этого материала имеют достаточно высокие показатели износостойкости и сопротивления коррозии, небольшой процент отбраковки после длительной работы в скважине. Это обусловило включение таких ступеней в ЕТТ нефтяных компаний к ЭЛН при осложненных условиях эксплуатации. Однако такие ступени достаточно дороги. Это объясняется рядом факторов: высокой ценой на никель, которого в металле должно быть не менее 16 %; высоким



уровнем брака при литье из нирезиста; трудностями механической обработки литых заготовок. При этом ступени из нирезиста достаточно быстро «зарастают» отложениями солей и парафина, недостаточна их износостойкость при наличии в пластовом флюиде твердых абразивных механических примесей (рис. 3).

Уже более 20 лет для изготовления ступеней насосов для добычи нефти используются методы порошковой металлургии, впервые массово примененные для изготовления рабочих органов компанией «Новомет-Пермь». Технология позволяет получать достаточно чистые поверхности рабочих каналов при очень высоком коэффициенте использования материала (малый процент отходов). Состав металлического порошка можно варьировать в довольно широких пределах в зависимости от условий эксплуатации насосных установок. К ограничениям такой технологии относится невозможность изготовления пространственно-искривленных лопастей РК и НА, что не позволяет получать ступени с высокими коэффициентами быстроходности. К недостаткам указанного способа изготовления рабочих органов ЭЛН можно отнести и достаточно высокую стоимость изделий. Износостойкость ступеней, выполненных из высоколегированных металлических порошков, сопоставима с износостойкостью ступеней из нирезиста [4].

Для повышения износостойкости деталей в практике машиностроения часто применяются специальные ле-



Рис. 4. Ступени, выполненные с помощью технологии «штамповка + сварка»

Fig. 4. Stages manufactured by “stamping-welding” technology

гированные стали. Однако использование технологии литья ступеней малогабаритных скважинных насосов из легированных сталей до сих пор было ограничено очень высокими затратами. В связи с этим некоторые российские (например, АО «АЛМАЗ») и зарубежные (Grundfos и др.) фирмы освоили выпуск ступеней ЭЛН из легированных сталей с помощью штамповарных технологий (рис. 4).

Сравнительные стендовые испытания показали, что износостойкость ступеней из нержавеющей стали, выполненных методом «штамповка + сварка», выше, чем износостойкость ступеней, выполненных методом литья из никелевого чугуна (нирезиста).

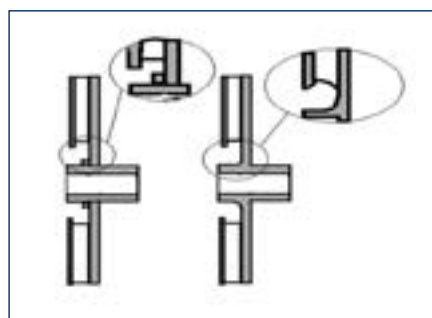
Скорость износа штамповарных ступеней по потере массы оказалась примерно в два раза ниже скорости износа ступеней из нирезиста [7]. При этом необходимо учитывать, что показатели напора и КПД у ступеней, изготовленных по технологии «штамповка + сварка», несколько ниже, чем у ступеней, выполненных методом литья. Это связано с тем, что проточные каналы штамповарных ступеней, как правило, не имеют плавных переходов, что снижает их гидродинамическое качество (рис. 5).

Другим вариантом использования высокопрочных нержавеющей сталей при изготовлении рабочих органов центробежных насосов является применение современных многокоординатных обрабатывающих центров. Внешний вид рабочих колес и направляющих аппаратов из нержавеющей стали, из-

Таблица 1. Технические характеристики рабочего колеса условного габарита электроприводного лопастного насоса 5 диаметром 71 мм с подачей 80 м³/сут

Table 1. Rotor specifications of a representative size of electrically driven vane pump 5 of 71 mm diameter with pumping capacity of 80 m³/day

Материал Material	Параметры Parameters					
	Масса, г Weight, g	Твердость по Бриннелю (НВ) или по Виккерсу (НВ) Hardness according Brinell (HB) or Vickers (HV) scales	Относительная адгезия к солям/асфальтосмолопарафиновым отложениям Relative adhesion to salts/asphalt-resin-paraffin depositions	Относительная интенсивность износа Relative wear rate	Относительная стоимость изготовления Relative manufacturing cost	Относительная коррозионная стойкость Relative anticorrosion
Серый чугун Grey iron	165	170 HB	1,00	1,00	1,0	1,0
Никелевый чугун (нирезист) Nickel cast iron (Ni-resist)	170	190 HB	0,90	0,72	2,2	1,9
Нержавеющая сталь (штамповка) Stainless steel (stamp welding)	106	240 HB	0,75	0,31	2,0	2,5
Нержавеющая сталь (механическая обработка) Stainless steel (machining)	85	280 HB	0,70	0,29	2,0	2,5
Полимер (жидкокристаллический и др.) Polymer (mesomorphic and others)	44	–	0,34	0,15	1,9	4,0
Алюминиевый сплав + микродуговое оксидирование Aluminium alloy + microarc oxidation	48	1200 HV	0,45	0,05	2,2	2,5
Порошок железграфитовый Ferrographite powder	110	190 HB	0,90	0,74	2,0	1,8
Порошок коррозионно-стойкий Anticorrosion powder	115	210 HB	0,90	0,70	2,2	2,5



а) а) б) б)

Рис. 5. Схема проходных каналов рабочих колес, выполненных по технологиям:

а) «штамповка + сварка»;

б) «литье + механическая обработка»

Fig. 5. Diagram of rotor ducts manufactured by the following technologies:

а) “stamping + welding”; б) “casting + machining”

готовленных на 4-координатном обрабатывающем центре, представлен на рис. 6. Использование данной технологии изготовления позволяет очень быстро перенастраивать производство на выпуск совершенно различных по конструкции (диаметр, количество и наклон рабочих лопаток, монтажная высота и т. д.) рабочих органов, снижает расход материала, обеспечивает высокую чистоту поверхности.

С помощью этой же технологии можно изготавливать рабочие органы из алюминиевого сплава. При этом производительность многокоординатного центра и стойкость режущего инструмента повышается в 3–5 раз по сравнению с изготовлением рабочих органов ЭЛН из

нержавеющей стали. Для повышения износостойкости, сопротивления коррозионным поражениям и уменьшения адгезии поверхности рабочих органов из алюминиевых сплавов к солям и асфальтосмолопарафиновым отложениям (АСПО) эти детали подвергаются микродуговому оксидированию (МДО). В результате обработки на поверхности деталей образуется слой наноструктурированного керамического покрытия. Твердость покрытия составляет 1100–1300 HV, толщина – 0,035–0,5 мм. Помимо высокой износостойкости и низкой адгезии к солям и парафину рабочие органы из алюминиевых сплавов имеют малую массу, что благоприятно сказывается на вибрационных характери-

# NDT

RUSSIA

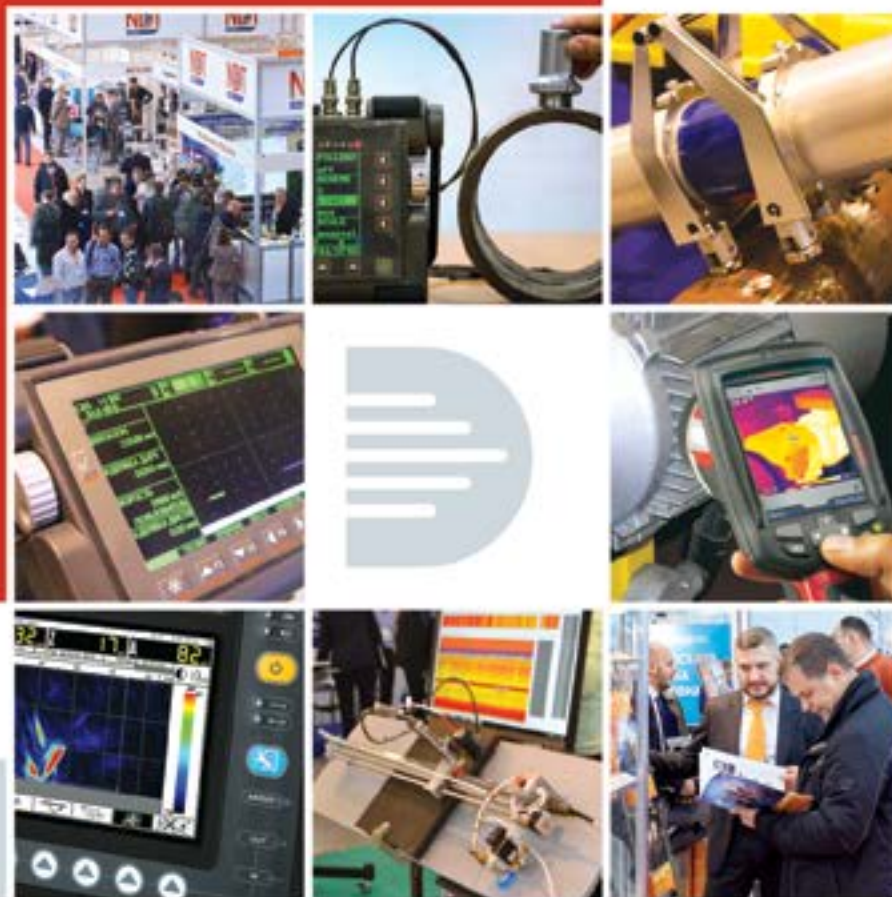
ufi  
Approved  
Event

# NDT Russia

18-я Международная выставка  
оборудования для неразрушающего  
контроля и технической диагностики

23–25  
октября  
2018

Москва,  
Крокус Экспо



Организаторы:



+7 (812) 380 6002/00  
ndt@primexpo.ru

Получите электронный билет:  
**ndt-russia.ru**

12+

Таблица 2. Твердость деталей радиальных подшипников электроприводных лопастных насосов

Table 2. Hardness of radial bearings details for electrically driven vane pumps

Материал Material	Твердость по Бринеллю и Роквеллу Brinell and Rockwell scales	Твердость по Виккерсу Hardness according Vickers scale	Условия применения Application conditions
Бронза Бр03Ц7С5Н1 Bronze Br03Ts7C5R1	107–120 HB	107–120 HV	Наличие механических примесей до 100 мг/л твердостью не более 5 ед. Мооса Presence of mechanical impurities up to 100 mg/L, hardness – max 5 units according to the Mohs scale
Сталь 40Х13 Steel 40Kh13	46–51 HRC	477–556 HV	Наличие механических примесей до 500 мг/л твердостью не более 5 ед. Мооса Presence of mechanical impurities up to 500 mg/L, hardness – max 5 units according to the Mohs scale
Сплав ВК8-В Alloy VK8-V	88–91 HRA	1320–1430 HV	Наличие механических примесей до 1000 мг/л твердостью не более 7 ед. Мооса Presence of mechanical impurities up to 1000 mg/L, hardness – max 7 units according to the Mohs scale

Примечание: твердость кварца – 7 ед. по шкале Мооса, или 1200 HV.

Note: quartz hardness – 7 units according to the Mohs scale or 1200 HV.

как скважинных насосных установок, работающих при высоких скоростях вращения ротора (более 4000 об/мин). Перечисленные варианты материалов для изготовления ступеней ЭЛН в принципе позволяют обеспечить высокоэффективными рабочими органами центробежные насосы для всех условий эксплуатации, в том числе при осложнениях, обусловленных:

- коррозией (ниррезист, полимеры, коррозионностойкие порошки и нержавеющая сталь);
- отложениями солей и парафина (полимеры, алюминиевые сплавы + МДО и нержавеющая сталь);
- выносом абразивных механических примесей (полимерные материалы, нержавеющая сталь, алюминиевый сплав с нанокерамическим покрытием).

Рекомендуемые области применения и основные технические характеристики рабочих колес ЭЛН, выполненных из разных материалов, представлены в табл. 1.

## ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ ЭЛН

Лопастные (центробежные) насосы для добычи нефти являются роторной машиной, имеющей малые диаметральные и большие осевые габариты. Длинный (до 8 м) вал диаметром 12,8–30,0 мм несет на себе до 350 рабочих колес, динамическая балансировка которых производится в крайне редких случаях. Динамический дисбаланс рабочих



а) а)



б) б)

Рис. 6. Общий вид рабочих органов ступени электроприводного лопастного насоса, выполненных на многокоординатном обрабатывающем центре из нержавеющей стали и алюминиевых сплавов:

а) сбоку; б) сверху

Fig. 6. Overview of operative parts of electric vane pump stages manufactured at multicoordinate

machining center and made of stainless steel and aluminum alloys

а) side view; б) top view

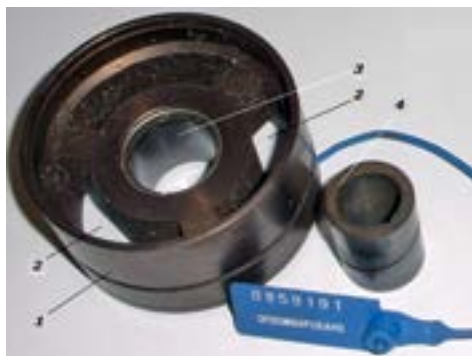


Рис. 7. Радиальный подшипник электроприводного лопастного насоса:

1 – корпус; 2 – канал для прохода жидкости; 3 – неподвижная втулка; 4 – вращающаяся втулка

Fig. 7. Radial bearing of an electric vane pump:

1 – housing; 2 – water ducts; 3 – fixed hub; 4 – free hub

колес, неравномерное поступление газожидкостной смеси и механических примесей в рабочие органы насоса, собственные частоты колебаний длинных валов – все это требует использования в ЭЛН не только концевых, но и промежуточных радиальных подшипников. Все радиальные подшипники ЭЛН вы-

полнены по одной конструктивной схеме: на вращающемся валу размещена защитная втулка, которая вращается внутри неподвижной опорной втулки, установленной в корпусе подшипника, входящего в сборку направляющих аппаратов. В корпусе подшипника имеются каналы для пропускания перека-

Таблица 3. Области применения и основные сравнительные характеристики вариантов сборки электроприводных лопастных насосов  
Table 3. Applications and basic comparative performance of assembling options for electrically driven vane pumps

Вариант сборки Alternate assembly	Область применения Application	Относительный напор Relative head	Относительный КПД Relative efficiency coefficient	Относительная стоимость Relative cost
Классическая* Classic*	Наличие механических примесей до 100 мг/л твердостью не более 5 ед. Мооса Presence of mechanical impurities up to 100 mg/L, hardness – max 5 units according to the Mohs scale	1,0	1,0	1,0
Радиально-стабилизированная Radial-stabilized	Наличие механических примесей до 500 мг/л твердостью не более 5 ед. Мооса Presence of mechanical impurities up to 500 mg/L, hardness – max 5 units according to the Mohs scale	0,95	0,95	1,2
Компрессионная Compressive	Наличие механических примесей до 700–1000 мг/л твердостью не более 5 ед. по шкале Мооса Presence of mechanical impurities up to 700–1000 mg/L, hardness – max 5 units according to the Mohs scale	0,9**	0,9**	1,7
Пакетная Packaged	Наличие механических примесей до 700–1000 мг/л твердостью не более 7 ед. по шкале Мооса Presence of mechanical impurities up to 1000 mg/L, hardness – max 7 units according to the Mohs scale	0,93	0,92	2,5

\* Показатели классической сборки приняты за 1,0.

\* Figures of classic assembly are taken to be 1.0.

\*\* Для нового насоса.

\*\*\* For a new pump.

чиваемой насосом жидкости (рис. 7). Конструктивные отличия заключаются в форме проходных каналов, используемых материалах и форме вращающихся и неподвижных втулок.

Пары трения «неподвижная втулка – вращающаяся втулка» радиальных подшипников по используемому материалу могут быть следующими: «сталь – бронза», «твердый сплав – твердый сплав», «сталь – резина», «твердый сплав – силицированный графит» и т. д. В последнее время часто для изготовления вращающейся втулки используются достаточно дешевые стальные или алюминиевые материалы с нанесением на них специальных износостойких покрытий.

Неподвижные и вращающиеся втулки могут иметь цилиндрические поверхности, но могут быть выполнены с продольными или винтовыми канавками, служащими для создания гидравлического клина между втулками, а также для выноса механических примесей потоком жидкости из зоны контакта втулок (рис. 8).

В табл. 2 приведены значения твердости деталей пар трения радиальных



Рис. 8. Внешний вид защитных вращающихся втулок радиальных подшипников после испытаний на износ в модельной жидкости

Fig. 8. Appearance of protecting free hubs of radial bearings after the wear test in model water

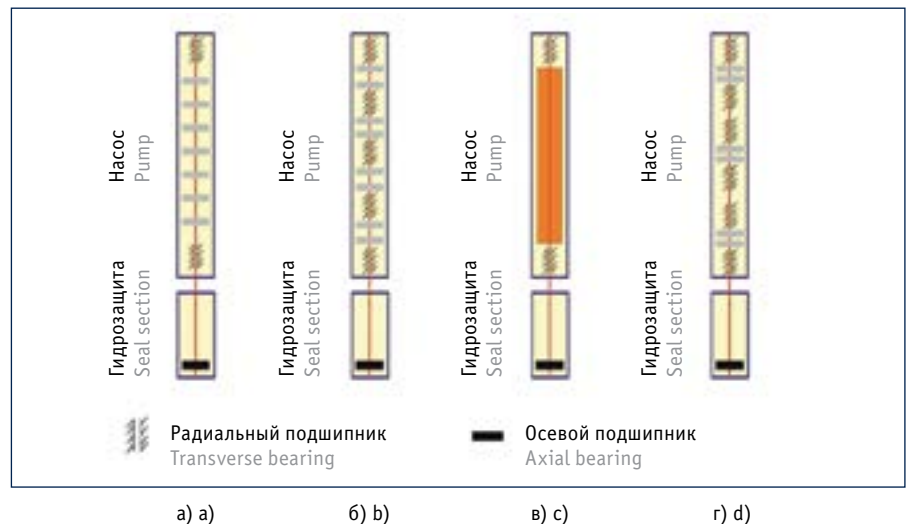


Рис. 9. Схемы сборки лопастного насоса для добычи нефти [7]:

а) классическая, концентрация взвешенных частиц – до 0,1 г/л; б) радиально-стабилизированная, концентрация взвешенных частиц – до 0,5 г/л; в) компрессионная, концентрация взвешенных частиц – до 0,7–1,0 г/л; г) пакетная, концентрация взвешенных частиц – до 1,0 г/л

Fig. 9. Assembly configurations of oil production vane pumps [7]:

a) classical, concentration of suspended particles – up to 0.1 g/l; b) radial-stabilized, concentration of suspended particles – up to 0.5 g/l; c) compressive, concentration of suspended particles – up to 0.7–1.0 g/l; d) packet, concentration of suspended particles – up to 1.0 g/l



Таблица 4. Зависимость компоновки электроприводных лопастных насосов от условий эксплуатации

Table 4. Assembly dependence of electrically driven vane pumps on operating conditions

Условия эксплуатации Operating conditions	Рабочие колеса ступени Stage rotors					
	Колесо одноопорное Single-support rotor	Колесо двухопорное Double-support rotor	Колесо открытое Open rotor	Колесо полукрытое Semi-open rotor	Колесо закрытое Closed rotor	Колесо центробежно-вихревое Inclined rotor
Низкая вязкость, мало механических примесей, мало свободного газа Low viscosity, few mechanical impurities, not much of free gas	*****	*	*	**	*****	***
Высокая вязкость, мало механических примесей, мало свободного газа High viscosity, few mechanical impurities, not much of free gas	*****	*	**	**	**	*
Низкая вязкость, много механических примесей, мало свободного газа: Low viscosity, a lot of mechanical impurities, not much of free gas • высокий дебит high production rate • низкий дебит low production rate	*	***	***	***	****	***
	**	*****	*****	***	**	**
Низкая вязкость, много механических примесей, много свободного газа: Low viscosity, a lot of mechanical impurities, much free gas • высокий дебит high production rate • низкий дебит low production rate	*	***	****	****	****	**
	*	****	*****	****	**	****

Примечание: количество звездочек обозначает предпочтительность (5 звезд) или невозможность (1 звезда) эффективного использования компоновки оборудования.

Notes: the number of asterisks denotes: preference (5 asterisks) or impossibility (1 asterisk) to effectively use the equipment assembling design.

подшипников («втулка неподвижная – втулка вращающаяся защитная») и рекомендуемые области их применения, а на рис. 8 – вид защитных вращающихся втулок после стендовых испытаний в коррозионно-эрозионной модельной жидкости.

## ВЫБОР ТИПА СБОРКИ ЭЛН

В настоящее время применяются четыре вида сборок лопастных (центробежных) насосов для добычи нефти [8], каждая из которых имеет определенные преимущества при различных условиях эксплуатации (рис. 9).

Так называемая классическая сборка насоса означает наличие двух концевых радиальных подшипников (в некоторых случаях используется и осевой подшипник вала, расположенный в верхней части (головке) насоса). Насосы классической сборки предназначены

для работы в неосложненных условиях эксплуатации: до 100 мг/л механических примесей твердостью не более 5 баллов по шкале Мооса. Насос этого типа сборки является самым бюджетным и имеет максимальный начальный КПД, минимальные механические и гидродинамические потери в подшипниковых узлах. Кроме того, отсутствие промежуточных подшипников дает возможность в корпусе определенной длины установить дополнительное число ступеней, что увеличивает напор насоса.

Радиально-стабилизированная схема (с промежуточными радиальными подшипниками) применяется при увеличенной до 500 мг/л концентрации механических примесей, имеющих твердость до 7 баллов по шкале Мооса. Наличие промежуточных радиальных подшипников увеличивает жесткость ротора насоса, снижает износ пар

трения «втулка рабочего колеса – расточка направляющего аппарата» и существенно увеличивает наработку до отказа насоса при откачке пластового флюида с механическими примесями. При этом часть рабочих насосных ступеней из насоса извлекается, чтобы можно было установить промежуточные подшипники. Расчеты показывают, что промежуточные подшипники необходимо устанавливать на вал насоса через каждые 500–800 мм. В этом случае в 6-метровый корпус насоса необходимо поместить 8–12 промежуточных подшипников и, соответственно, убрать некоторое количество ступеней. Кроме напора насос радиально-стабилизированной сборки будет терять некоторое количество энергии на преодоление дополнительных гидравлических сопротивлений в корпусах промежуточных подшипников.

# ExpoCoating Moscow

**16-я Международная выставка  
технологий, оборудования  
и материалов для обработки  
поверхности и нанесения покрытий**

**23–25  
октября  
2018**

**Москва,  
Крокус Экспо**



Организаторы:



+7 (812) 380 6002/00  
coating@primexpo.ru

Получите электронный билет:

**[expocoating-moscow.ru](http://expocoating-moscow.ru)**

12+

Таблица 5. Зависимость компоновки электроприводных лопастных насосов от количества механических примесей и уровня коррозионной активности

Table 5. Assembly dependence of electrically driven vane pumps on the quantity of mechanical impurities and corrosion activity level

Количество механических примесей, уровень коррозионной активности Quantity of mechanical impurities, corrosion activity level	Материал рабочих органов Material of operating elements						Радиальный подшипник Radial bearing				Сборка насоса Pump assembling			
	Серый чугун Grey iron	Нирезист Ni-resist	Нержавеющая сталь (штампосварка) Stainless steel (stamp welding)	Нержавеющая сталь (механическая обработка) Stainless steel (machining)	Полимер Polymer	Порошок Powder	Пара «сталь – бронза» Couple "steel – bronze"	Пара «сталь – резина» Couple "steel – resin"	Пара «твердый сплав – SiC» Couple "hard alloy – SiC"	Пара «твердый сплав – твердый сплав» Couple "hard alloy – hard alloy"	Классика Classic	Радиально-стабилизированная Radial-stabilized	Компрессионная Compressive	Пакетная Packaged
Мало механических примесей, низкая коррозионная активность Few mechanical impurities, low corrosion activity	*****	****	***	***	***	****	*****	*****	***	***	*****	*****	***	***
Мало механических примесей, высокая коррозионная активность Few mechanical impurities, high corrosion activity	***	*****	*****	*****	*****	*****	***	***	*****	*****	*****	*****	***	***
Много механических примесей, низкая коррозионная активность A lot of mechanical impurities, low corrosion activity	***	****	*****	*****	****	****	**	****	*****	*****	**	***	****	****
Много механических примесей, высокая коррозионная активность A lot of mechanical impurities, high corrosion activity	*	***	****	****	***	***	*	***	*****	*****	*	**	*****	*****

Примечание: количество звездочек обозначает предпочтительность (5 звезд) или невозможность (1 звезда) эффективного использования компоновки оборудования.

Notes: the number of asterisks denotes: preference (5 asterisks) or impossibility (1 asterisk) to effectively use the equipment assembling design.

Компрессионная сборка предусматривает жесткую установку всех рабочих колес на приводном валу, без возможности их осевого перемещения. Все осевые нагрузки, в том числе создаваемые на каждом рабочем колесе за счет разности давления, передаются на вал насоса и по нему – на осевую опору насосной установки, которая располагает-

ся в гидрозашите погружного электродвигателя. При начале эксплуатации такого насоса между рабочими колесами и направляющими аппаратами нет физического контакта, что позволяет устранить и механический (контактный) износ при наличии механических примесей. По мере износа осевой опоры насосной установки сборка «вал + рабо-

чие колеса» опускается, в конце концов обеспечивая посадку рабочих колес на направляющие аппараты. После этого насос начинает работать так же, как и насос классической сборки. Необходимо учитывать, что кроме сложности сборки компрессионных насосов (так называемое шимсование) эти насосы имеют пониженный КПД в течение зна-

чительного времени (до посадки рабочих колес на направляющие аппараты). Это происходит за счет значительных утечек в ступенях, т. е. за счет снижения объемного КПД ступеней.

Пакетная сборка практически является сборкой нескольких «насосов» в одном корпусе. «Насос», или пакет, состоит из нескольких ступеней, имеющих один общий осевой и промежуточный радиальный подшипник. Количество ступеней в пакете меняется в зависимости от их монтажной высоты. Обычно общая монтажная высота пакета ступеней с концевым комбинированным (осевой + радиальный) подшипником составляет 300–500 мм. Такая сборка имеет высокую радиальную жесткость (за счет использования большого количества промежуточных

радиальных подшипников), а также увеличенный ресурс осевых подшипников самой ступени (за счет наличия осевого подшипника пакета ступеней). Конструкция имеет достаточно высокую стоимость и уменьшенный КПД за счет увеличения количества подшипниковых устройств и может быть рекомендована для работы в скважине с выносом значительного количества абразивных механических примесей. В табл. 3 представлена информация по областям применения и основным сравнительным характеристикам разных вариантов сборки лопастных насосов для добычи нефти.

Интегрирование данных, приведенных по составляющим ЭЛН для добычи нефти, позволяет создать обобщенные таблицы (матрицы) компоновки ЭЛН в

зависимости от условий эксплуатации (табл. 4, 5). Количество звездочек обозначает предпочтительность (5 звезд) или невозможность (1 звезда) эффективного использования компоновки оборудования.

Использование представленных рекомендаций по компоновке ЭЛН позволит повысить эффективность добычи нефти с помощью УЭЛН в осложненных условиях эксплуатации.

В статье не представлена информация по применению различных конструктивных и технологических приемов использования предвключенных устройств, обеспечивающих значительное расширение областей эффективного применения ЭЛН, – их автор планирует рассмотреть в следующей публикации.

#### Литература:

1. ГОСТ Р 56830–2015. Нефтяная и газовая промышленность. Установки скважинных электроприводных лопастных насосов. Общие технические требования [Электронный источник]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200128305> (дата обращения: 05.09.2018).
2. Ивановский В.Н. К вопросу о параметрических рядах установок электроприводных центробежных насосов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 6. С. 56–62.
3. Слепченко С.Д. Оценка надежности УЭЦН и их отдельных узлов по результатам промысловой эксплуатации: автореферат дис. ... канд. техн. наук. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 22 с.
4. Пономарев А.А. Применение центробежно-вихревых насосов для добычи нефти в ОАО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз» // Мат-лы II Междунар. науч. конф. «Технические науки: проблемы и перспективы». СПб.: Заневская площадь, 2014. С. 123–125.
5. Бортников А.Е., Ивановский В.Н., Кузьмин А.В. и др. О возможности эксплуатации боковых стволов малого диаметра установками электроцентробежных насосов с открытыми рабочими колесами на примере месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 4. С. 28–32.
6. Меркушев Ю.М. Низкоадгезионные ЭЦН. Эксплуатационная и экономическая эффективность применения // Нефтегазовая вертикаль. 2011. № 12. С. 76–78.
7. Деговцов А.В., Соколов Н.Н., Ивановский А.В. К вопросу о выборе материала ступеней электроцентробежного насоса для осложненных условий эксплуатации // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 11. С. 88–91.
8. Быков И.Ю., Бочарников В.Ф., Ивановский В.Н. и др. Техника и технология добычи и подготовки нефти и газа: Учебник для вузов: В 2-х т. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. Т. 2. 420 с.

#### References:

1. National Standard (GOST R) 56830–2015. Petroleum and Natural Gas Industries. Electrical Submersible Pump Units. General Technical Requirements [Electronic source]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/1200128305> (access date – September 5, 2018). (In Russian)
2. Ivanovskiy V.N. The Question of Parametric Series of Equipments of Electric Submersible Centrifugal Pumps. Territorija «NEFTEGAS» = Oil and Gas Territory, 2017, No. 6, P. 56–62. (In Russian)
3. Slepchenko S.D. Assessment of Reliability of ESP and Its Individual Units on the Results of Field Operation. Author's abstract of the Ph.D. thesis in Engineering Science. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2011, 22 p. (In Russian)
4. Ponomarev A.A. Application of Inclined Rotor Pumps for Crude Oil Production in Gazpromneft-Noyabrskneftegaz OJSC. Proceedings of the II International Scientific Conference “Engineering Science: Problems and Prospects”. Saint-Petersburg, Zanevskaya ploschad', 2014, P. 123–125. (In Russian)
5. Bortnikov A.E., Ivanovskiy V.N., Kuzmin A.V., et al. The Possibility for Exploitation by the Lateral Holes of Small Diameter ESP Installations with Open Impellers illustrated an Example of Fields of LUKOIL – West Siberia LLC. Territorija «NEFTEGAS» = Oil and Gas Territory, 2018, No. 4, P. 28–32. (In Russian)
6. Merkushev Yu.M. Low-Adhesive ESP. Operational and Economic Efficiency of Application. Neftegazovaya vertikal' = Oil and Gas Vertical, 2011, No. 12, P. 76–78. (In Russian)
7. Degovtsov A.V., Sokolov N.N., Ivanovskiy A.V. On Selection of Electric Centrifugal Pump Stages Material for Complicated Conditions Of Operation. Territorija «NEFTEGAS» = Oil and Gas Territory, 2016, No. 11, P. 88–91. (In Russian)
8. Bykov I.Yu., Bocharnikov V.F., Ivanovskiy V.N., et al. Equipment and Technology of Oil and Gas Production and Treatment. Textbook for higher education. In 2 vol. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2015, Vol. 2, 420 p. (In Russian)