

УДК 622.276.53:[620.178.162+621.65+678]

С.Б. Якимов¹, e-mail: s_yakimov@rosneft.ru; М.Н. Каверин²; И.М. Голубь²; А.Ю. Кононов³

¹ ПАО «НК «Роснефть» (Москва, Россия).

² ООО «РН-ЦЭПИТР» (Тюмень, Россия).

³ АО «РН-Няганьнефтегаз» (Нягань, Россия).

Комплексное изучение эффективности применения электроцентробежных насосов с колесами из полимерных композиционных материалов на примере АО «РН-Няганьнефтегаз»

Одним из мировых трендов в технике является постепенное замещение традиционных материалов на полимерно-композитные. В нефтяной отрасли одним из направлений применения полимерно-композитных материалов стало изготовление рабочих колес электроцентробежных погружных насосов. Однако на сегодняшний день ни у промышленных инженеров, ни у представителей научного сообщества нет однозначного мнения относительно того, является ли данное направление верным или это тупиковый путь эволюционного развития в конструировании электроцентробежных насосов. По этой причине данное оборудование пока еще широко не используется на нефтяных месторождениях как за рубежом, так и в России.

Специалисты ПАО «НК «Роснефть» в целях поиска новых технологий, позволяющих сократить совокупные затраты на эксплуатацию механизированных скважин, реализуют проекты по испытанию партий различного оборудования, в т. ч. электроцентробежных насосов с рабочими колесами из полимерных материалов. В статье приведен комплексный сравнительный анализ применения насосов с колесами из традиционных и полимерных материалов на нефтяных месторождениях с терригенными коллекторами АО «РН-Няганьнефтегаз» (дочернего общества ПАО «НК «Роснефть»). Подробно описаны условия эксплуатации оборудования, на основании статистических данных отказов впервые проведен анализ сравнительной надежности насосов с рабочими колесами из разных материалов. Представлены результаты сравнительного анализа величины и характера износа основных деталей насосов, а также сведения о динамике деградации расходно-напорной характеристики. Отмечено, что производители оборудования должны решить проблему повторного использования рабочих колес из полимерно-композитных материалов после их списания. Представлен анализ экономической эффективности применения данного вида оборудования. На основании сведений о преимуществах и недостатках эксплуатации электроцентробежных погружных насосов с рабочими колесами из полимерно-композитного материала сформулированы основные направления повышения конкурентоспособности данного оборудования, поставлены технические задачи перед производителями.

Ключевые слова: электроцентробежные насосы с колесами из полимерных материалов, повышение эффективности механизированной добычи нефти, ресурс работы электроцентробежного насоса, вид износа колес электроцентробежных насосов, борьба с отложениями солей, применение полифениленсульфида при добыче нефти.

.....

S.B. Yakimov¹, e-mail: s_yakimov@rosneft.ru; M.N. Kaverin²; I.M. Golub²; A.Yu. Kononov³

¹ Rosneft Oil Company PJSC (Moscow, Russia).

² Peer Review and Technical Development Center LLC (Tyumen, Russia).

³ RN-Nyaganneftegaz JC (Nyagan, Russia).

A Comprehensive Study of the Effectiveness Usage of Electrical Submersible Pumps with Impellers Made of Polymer Composites as in the Case of RN-Nyaganneftegaz JC

Gradual substitution of conventional materials with polymer composites constitutes one of the global trends in technology. Application of polymer-based composites for production of impellers of electrical submersible pumps has become one of the areas in the oil industry where those materials have been used. But as of today, neither field engineers nor representatives of the scientific community have formed a consolidated opinion on whether this

is the right direction or a dead-end road of the evolutionary development in the design process of electrical submersible pumps. For this reason, that kind of equipment has not been broadly used so far in foreign oil fields, as well as in the fields located in the territory of the Russian Federation. Aiming to find out new technologies that allow to cut aggregate costs related to the operation of artificial lift wells, specialists of Rosneft implement projects focused on testing different lots of equipment, including electrical submersible pumps with polymer composite impellers. A comprehensive comparison study has been made in the article illustrating how pumps with impellers manufactured from conventional and polymer-based materials are being used in the oil fields with clastic reservoirs operated by RN-Nyaganneftegaz JC (Rosneft's Sub). Operational conditions of the equipment were described in detail, and for the first time, based on statistical analysis of its failure, an analytic investigation of the comparative reliability of pumps with impellers made of different materials has been conducted. Data on a comparative study on the wear rate and behavior of the main pump parts, as well as on the performance degradation of the pump that affects its head and flow rate has been given. The article draws attention to the necessity for producers to solve the problem of a repeated use of impellers made of polymer composites following their retirement. An overview of economic viability of the equipment use is presented. Based on information about derived advantages and deficiencies of the use of electrical submersible pumps with impellers made of polymer composites, the main areas of focus to increase the competitiveness of the equipment have been indicated, while formulating clear technical tasks for manufacturers of how to enhance its competitive edge.

Keywords: electrical submersible pump with impellers made of polymer composites (liquid crystalline polymers, polycrystalline materials), ESP, improving artificial lift efficiency, operational life of electrical submersible pumps, wear types of impellers of electrical submersible pumps, scale control, applying polyvinyl sulfide in oil production.

Полимерно-композитные материалы (ПКМ) получили широкое распространение благодаря своим во многом уникальным свойствам. Решающим фактором быстрого развития производства ПКМ явилась конкуренция с традиционными материалами. В настоящее время без ПКМ не может обойтись ни одна отрасль промышленности [1]. Не стала исключением и нефтегазодобывающая отрасль, где ПКМ применяются практически на всех этапах пути углеводородного сырья от промыслов к потребителям [2].

Хотя в нефтегазовой отрасли ПКМ применяется пока в основном для создания защитных покрытий на поверхности металлов [2], одним из активно развивающихся направлений стало изготовление рабочих колес (РК) для электроцентробежных насосов (ЭЦН). Впервые ЭЦН с РК из ПКМ были применены более 50 лет назад на месторождениях Азербайджана в целях изучения возможности увеличения наработки при эксплуатации неглубоких скважин, осложненных выносом песка [3]. Ряд нефтегазодобывающих компаний РФ использует ЭЦН с РК из ПКМ и в на-

стоящее время, о чем свидетельствует большое количество источников [4–6]. Однако все известные публикации посвящены лишь изучению возможности снижения вероятности отложения солей в ЭЦН за счет более низких адгезионных свойств РК из ПКМ по сравнению с РК из чугуна. При этом такие основные свойства любой гидравлической машины, как надежность и ремонтпригодность, авторами статей не рассматриваются вообще либо рассматриваются лишь частично. Даже столь важный показатель, как коэффициент полезного действия (КПД), рассматривается лишь в плане возможности повышения энергоэффективности при добыче вязкой нефти [7]. Возникает логичный вопрос, насколько применение ЭЦН с РК из ПКМ сопоставимо по надежности и ремонтпригодности с ЭЦН с РК из широко используемого материала нирезист тип 1 в условиях добычи пластовой жидкости с разным содержанием абразивных частиц, коррозионно-активных компонентов и разных температур? Хотя испытания и применение данного оборудования ведутся давно, ни в отечественных, ни в зарубежных публика-

циях ответ на данный вопрос до сих пор не приводился.

Ведущие зарубежные производители ЭЦН многократно пытались использовать РК из ПКМ, хотя в настоящее время от этой идеи отказались, отдав предпочтение РК из нирезиста. К примеру, одно из подразделений компании General Electric разработало полимерный материал Lexan, обладающий уникальной стойкостью к износу, химической стойкостью и прочностью, что позволило компании Boeing применить этот материал в самолетостроении. Казалось бы, материал с такими свойствами может использоваться и для изготовления РК. Однако в официальных каталогах GE, ставшей после покупки активов Baker Hughes одним из крупнейших мировых производителей установок электроцентробежных насосов (УЭЦН), ЭЦН с РК из ПКМ отсутствуют. Еще один крупнейший зарубежный производитель – компания Schlumberger – много лет испытывал материал Ryton, но на сегодняшний день не предлагает своим заказчикам ЭЦН с РК из данного материала. В то же время на официальном сайте компании Pedrollo есть информация о выпуске

Ссылка для цитирования (for citation):

Якимов С.Б., Каверин М.Н., Голубь И.М., Кононов А.Ю. Комплексное изучение эффективности применения электроцентробежных насосов с колесами из полимерных композиционных материалов на примере АО «РН-Няганьнефтегаз» // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2019. № 5. С. 36–48.

Yakimov S.B., Kaverin M.N., Golub I.M., Kononov A.Yu. A Comprehensive Study of the Effectiveness Usage of Electrical Submersible Pumps with Impellers Made of Polymer Composites as in the Case of RN-Nyaganneftegaz JC. Territorija «NEFTEGAS» [Oil and Gas Territory]. 2019;5:36–48. (In Russ.)

дренажных насосов и погружных насосов для добычи воды из неглубоких скважин с РК из материала Lexap. Известно также, что детали из ПКМ успешно используются в горнодобывающей промышленности в грязевых и шламовых насосах [8]. Впрочем, условия эксплуатации насосов для добычи воды, как правило, отличаются от условий эксплуатации насосов для добычи нефти, прежде всего необходимостью обеспечения значительно большего напора и непрерывностью цикла работы последних. Условия эксплуатации насосов с РК из ПКМ, применяемых в горнодобывающей промышленности, также отличаются от условий добычи нефти из скважин – например, тем, что в наземном оборудовании всегда имеется возможность заменять изношенные детали. Кроме того, насосы, применяемые для перекачки пульпы, шлама и т. д., имеют гораздо меньшее число рабочих ступеней, но ступени эти значительно большего размера, что позволяет наносить ПКМ в качестве защитных покрытий.

Некоторые отечественные исследователи видят большой потенциал в использовании ПКМ в качестве покрытий, разрабатывают и проводят испытания новых видов полимерных покрытий деталей насосов, позволяющих уменьшить солеотложения, а также скорость абразивного и гидроабразивного износа [9, 10]. Ряд российских и зарубежных производителей предлагает ЭЦН с РК с защитными покрытиями, но этот вид оборудования не пользуется большим спросом по причине сравнительно высокой стоимости. В этой связи можно напомнить и о попытках компании Wood Group ESP использовать материал Teflon для снижения вероятности солеотложения и засорения рабочих ступеней механическими примесями при эксплуатации скважин на месторождениях штата Нью-Мехико [11]. И опять тот же результат: несмотря на успешно проведенные промысловые испытания, РК с покрытием из Teflon'a для защиты от солеотложения больше не применяются.

В работе одного из крупнейших российских специалистов [2] отмечено, что практическое применение полимеров, как и любых материалов,

ограничено. Лимитирующие факторы можно условно разделить на технические, технологические, экологические и экономические, причем последние являются главными в плане ограничений. И действительно, ситуация с применением ЭЦН с РК из ПКМ в Российской Федерации осложняется тем, что данное оборудование имеет большую стоимость по сравнению с ЭЦН с РК из нирезиста, очевидно, вследствие того, что материал закупается за рубежом, а также по причине отсутствия достаточного для обеспечения конкуренции количества поставщиков оборудования.

Таким образом, современная ситуация с применением ЭЦН с РК из ПКМ, сложившаяся в РФ, с одной стороны, не совпадает с трендом ведущих зарубежных производителей, а с другой – следует общему тренду в технике, в соответствии с которым происходит постепенное замещение деталей машин из традиционных материалов на детали из ПКМ. Является ли применение ЭЦН с РК из ПКМ верным направлением, или это тупиковый путь? Специалисты ПАО «НК «Роснефть» дают свою оценку технической и экономической целесообразности использования ПКМ взамен традиционных материалов.

ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

По мнению авторов статьи, главная проблема с внедрением ЭЦН с РК из ПКМ заключается в том, что ни инженерами-производственниками, ни производителями оборудования, ни тем более специалистами отраслевых научных учреждений до сих пор не определены все области возможного технологически и экономически эффективного применения данного оборудования. Кроме того, не установлены и не описаны комплексные специфические технические проблемы, возникающие при использовании ЭЦН с РК из ПКМ в скважинах с разными условиями эксплуатации. Это приводит к тому, что пока четко не сформировано задание производителем по доработке оборудования в целях повышения его эффективности и конкурентоспособности в сравнении с оборудованием, изготовленным из традиционных материалов. Целью статьи является комплексный анализ техноло-

гической эффективности применения ЭЦН с РК из ПКМ и выработка рекомендаций по повышению эффективности их дальнейшего использования на примере опыта одного из дочерних нефтегазодобывающих предприятий ПАО «НК «Роснефть». Поскольку, как уже было отмечено, сведения по сравнительной общей надежности УЭЦН с РК из ПКМ из нирезиста в технической литературе полностью отсутствуют, одной из целей авторов статьи было также исследование данного аспекта.

Сравнительный комплексный анализ проведен на основе данных фактической эксплуатации и дефектации отказавшего оборудования на месторождениях АО «РН-Няганьнефтегаз», расположенных в северо-западной части Западной Сибири. Основными объектами разработки на Талинском и Ем-Еговском месторождениях являются юрские пласты с хорошо сцементированными терригенными коллекторами. Аналогичные объекты разработки имеются на большинстве нефтяных месторождений Западной Сибири, где проблемы эксплуатации скважин с УЭЦН также совпадают.

По состоянию на 1 января 2019 г. фонд скважин, оборудованных ЭЦН с РК из ПКМ и ЭЦН с РК из нирезиста в АО «РН-Няганьнефтегаз» составлял 780 и 2159 соответственно. ЭЦН с РК из ПКМ в основном применяются в низкоадгезионном газоабразивостойком исполнении. Рабочая ступень двухпорной конструкции, РК с удлиненной ступицей и импеллером. Направляющие аппараты (НА) не содержат элементов из ПКМ и изготовлены методом литья из нирезиста. На рис. 1 представлено распределение ЭЦН с РК из ПКМ по используемым типоразмерам по состоянию на 1 января 2019 г. Большую часть составляет оборудование с номинальными подачами до 45 м³/сут, но в целях снижения вероятности отложения солей используются ЭЦН и с номинальными подачами до 400 м³/сут. Для применения данного оборудования выбираются скважины, на которых в ходе предшествующей эксплуатации были зафиксированы случаи отложения солей в насосе. После спуска ЭЦН с РК из ПКМ ингибиторная

защита не производится. В [5] было показано, что специалисты ПАО «Сургутнефтегаз», эксплуатирующие соседние месторождения, убедившись в том, что при использовании ЭЦН с колесами из ПКМ солевые отложения продолжают откладываться на НА из нирезиста, выработали стратегию использования данного оборудования только на скважинах с дебитом до 35 м³/сут. Подход специалистов АО «РН-Няганьнефтегаз» к применению данного вида оборудования несколько отличается и по этой причине требует анализа.

Поскольку ресурс работы любого погружного оборудования значительно зависит от условий эксплуатации, рассмотрим особенности добычи жидкости из скважин на месторождениях АО «РН-Няганьнефтегаз».

ИНДЕКС АГРЕССИВНОСТИ ВЫНОСИМЫХ ЧАСТИЦ

Концентрация абразивных частиц (КАЧ) в добываемой жидкости, степень их округлости и сферичности, а также их гранулометрический и минеральный состав определялись в лаборатории АО «НижневартовскНИПИнефть» инженером-петрофизиком по методике, описанной в [12]. КАЧ в изучаемых пробах жидкости, добываемой из пластов ВК и юрских пластов Талинского и Ем-Еговского месторождений, находится в диапазоне 0–80 мг/л. Среднее значение КАЧ составляет всего 18,7 мг/л [12]. По принятой зарубежными нефтяными компаниями классификации [13], показатель КАЧ от 11 до 50 мг/л является средним. Минеральный состав абразивных частиц представлен кварцем, преимущественно алевролитовых (менее 0,1 мм) фракций. Доля более крупных песчаных фракций (до 0,25 мм) невелика и в среднем составляет 2 %. Средний расчетный индекс агрессивности выносимых частиц – 48. Отметим, что зарубежные компании принимают за среднюю величину индекса агрессивности для месторождений с терригенными коллекторами 60. Таким образом, среднее значение индекса агрессивности частиц, присутствующих в жидкости, добываемой на месторождениях АО «РН-Няганьнефтегаз», ниже среднего значения большинства нефтяных

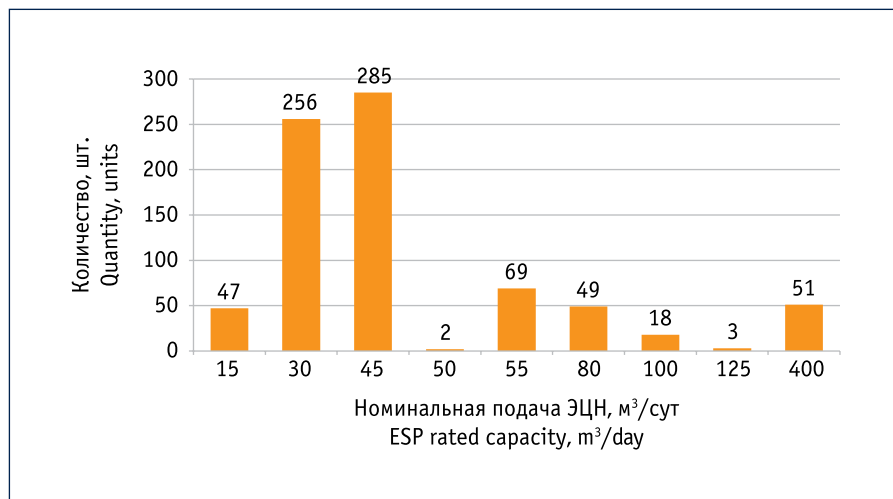


Рис. 1. Распределение электроцентробежных насосов с рабочими колесами из полимерно-композитных материалов в зависимости от типоразмеров

Fig. 1. Size distribution of centrifugal motor pumps with impellers being made of polymer-composite materials

месторождений с терригенными коллекторами. Доля присутствующих в добываемой жидкости мягких, неабразивных частиц составляет 81,3 % в общей концентрации взвешенных частиц. Минералогический состав абразивных частиц представлен кристаллами карбоната кальция, гидроокислами железа и углестым веществом, как и в большей части юрских пластов месторождений Западной Сибири с терригенными коллекторами [12]. Таким образом, условия эксплуатации ЭЦН по уровню воздействия абразивных частиц на месторождениях АО «РН-Няганьнефтегаз», по используемой зарубежными компаниями классификации, можно охарактеризовать как средние. Согласно исследованиям количество и качество присутствующих в добываемой жидкости абразивных частиц должно способствовать возникновению радиального и осевого износа рабочих органов ЭЦН, гидроабразивный износ должен оставаться на невысоком уровне.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОБЫВАЕМЫХ ВОД И СОДЕРЖАНИЕ В НИХ КОРРОЗИОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Поскольку ЭЦН с колесами из ПКМ применяются главным образом для снижения вероятности отложения солей, в табл. 1 представлены сведения о глубинах залегания, пластовой температуре, а также склонности пластовых

вод к отложению солей по основным объектам разработки месторождений АО «РН-Няганьнефтегаз». Из этих данных видно, что расчетные значения индекса насыщения вод карбонатом кальция (индекс Ланжелье) при пластовой температуре имеют положительные значения для всех объектов разработки. На основании этого можно сделать вывод о высокой склонности пластовых вод к отложению солей карбоната кальция в насосе. Воды пластов ВК и ЮК₄ также склонны к отложению солей сульфата бария. Содержание растворенного углекислого газа в добываемой жидкости невелико по сравнению с другими объектами разработки месторождений Западной Сибири. Как было показано в [14], невысокое содержание углекислого газа также способствует отложению солей карбоната кальция.

ТЕРМОБАРИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Количественной характеристикой теплостойкости ПКМ служит температура, при которой в условиях действия постоянной нагрузки деформация образца не превышает некоторую величину. Это связано с тем, что любое, даже незначительное повышение температуры приводит к снижению модуля упругости ПКМ. Данная характеристика является в некотором роде условной, но помогает правильно выбрать материал

Таблица 1. Сведения о глубинах залегания и пластовой температуре, а также склонности вод к отложению солей по основным объектам разработки месторождений АО «РН-Няганьнефтегаз»

Table 1. The data on occurrence depths and reservoir temperature as well as water scale susceptibility by RN-Nyaganneftegaz JS major reservoir engineering targets

| Показатели Characteristics | Основные объекты разработки Талинского и Ем-Еговского месторождений Main exploitation targets of Talinskoye and Em-Egovskoye fields | | | | | | | | | | |
|---|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----|
| | ВК ₁₋₁ VK ₁₋₁ | ЮК ₁ YuK ₁ | ЮК ₂ YuK ₂ | ЮК ₃ YuK ₃ | ЮК ₄ YuK ₄ | ЮК ₅ YuK ₅ | ЮК ₇ YuK ₇ | ЮК ₁₀ YuK ₁₀ | ДЮ _к DYu _к | ЮК ₁₁ YuK ₁₁ | |
| Средняя глубина ствола скважин до верхних дыр перфорации по вертикали, м Average depth of the borehole to the top perforating holes vertically, m | 1378 | 2318 | 2440 | 2466 | 2502 | 2517 | 2596 | 2648 | 2486 | 2655 | |
| Температура пласта, °С Reservoir temperature, °С | 59 | 105 | | | | | | 109 | 116 | 118 | |
| Содержание CO ₂ в добываемой жидкости, мг/л CO ₂ content in produced fluid, mg/l | 41,2 | 12,6 | 24,4 | 44,5 | 91,5 | 22,0 | 14,2 | 62,6 | 13,9 | 54,9 | |
| Индекс насыщения по карбонату кальция Saturation index of calcium carbonate | 2,0 | 3,0 | 3,5 | 3,3 | 3,1 | 3,5 | 3,4 | 3,0 | 2,8 | 2,7 | |
| Склонность вод к отложению солей карбоната кальция при пластовой температуре Tendency of water to scaling of salts of calcium carbonate at reservoir temperature | Сильные солеотложения Strong scaling | | | | | | | | | | |
| Индекс насыщения по сульфату кальция Saturation index of calcium sulphate | -2,9 | 0,0 | | | | -2,7 | 0,0 | | | -3,2 | 0,0 |
| Склонность вод к отложению солей сульфата кальция при пластовой температуре Tendency of water to scaling of salts of calcium sulfate at reservoir temperature | Нет солеотложения No scaling | | | | | | | | | | |
| Индекс насыщения по бариту Saturation index of barytes | 1,7 | 0,0 | | | 2,4 | 0,0 | | | | | |
| Склонность вод к отложению солей сульфата бария при пластовой температуре Tendency of water to scaling of salts of barium sulfate at reservoir temperature | Солеотложения Scaling | Нет солеотложения No scaling | | | Солеотложения Scaling | Нет солеотложения No scaling | | | | | |

для конкретных условий эксплуатации [1]. Поскольку для понимания условий работы детали из ПКМ крайне важно описать температурные условия, на рис. 2 представлен рассчитанный с использованием программы RosPump профиль температуры по скважине с УЭЦН, эксплуатирующей наиболее глубоко залегающий юрский пласт ЮК₁₁. Рассчитанный профиль свидетельствует о том, что при пластовой температуре 118 °С расчетная температура жидкости на выкиде насоса составляет 128,4 °С. Среднее давление на приеме ЭЦН, определенное по данным технологического режима эксплуатации скважин, составляет 5 МПа. Сравнительно высокое значение температуры в насосе в сочетании с относительно низким давлением на приеме являются факторами, способствующими выпадению солей карбоната кальция. Поскольку

в качестве материала для изготовления РК из ПКМ используется в основном полифениленсульфид – представитель класса термостойких полимеров, допускающий длительную эксплуатацию деталей при температуре 240 °С [15], температурные условия можно охарактеризовать как средние. Данное заключение сделано исходя из того, что на практике встречаются случаи эксплуатации в режиме значительного перегрева, при котором температура может превысить 200 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С РАБОЧИМИ КОЛЕСАМИ ИЗ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

По результатам анализа результатов дефектации 698 отказов ЭЦН с РК из ПКМ и 5331 отказа ЭЦН с РК из нирезиста

была определена общая вероятность безотказной работы УЭЦН. Как видно из рис. 3, для УЭЦН с РК из ПКМ этот показатель оказался немного выше вероятности аналогичного показателя для УЭЦН с РК из нирезиста. Наибольший интерес представляет изучение свойств ПКМ на предмет соответствия условиям эксплуатации скважин. Различают деформационные и прочностные свойства: деформационные характеризуют способность полимера деформироваться под действием механического напряжения, прочностные – способность сопротивляться разрушению. Из физических свойств, характеризующих полимеры, механические являются основными, поскольку они обеспечивают сохранение формы и размеров изделия при действии внешних силовых полей [1]. В результате анализа дефектации отказавших ЭЦН было

22-24 октября 2019
Москва, МВЦ «Крокус Экспо»



- Более 200 брендов продукции от ведущих мировых производителей

**18-я Международная выставка
«Насосы. Компрессоры.
Арматура. Приводы и двигатели»**



Забронируйте стенд
www.pcvexpo.ru

- Более 2800 посетителей – конечных потребителей-представителей предприятий нефтегазовой и химической промышленности, машиностроения, металлургии, водоснабжения, а также дилеров промышленного оборудования

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+7 (495) 252 11 07
pcvexpo@mvk.ru

Соорганизатор



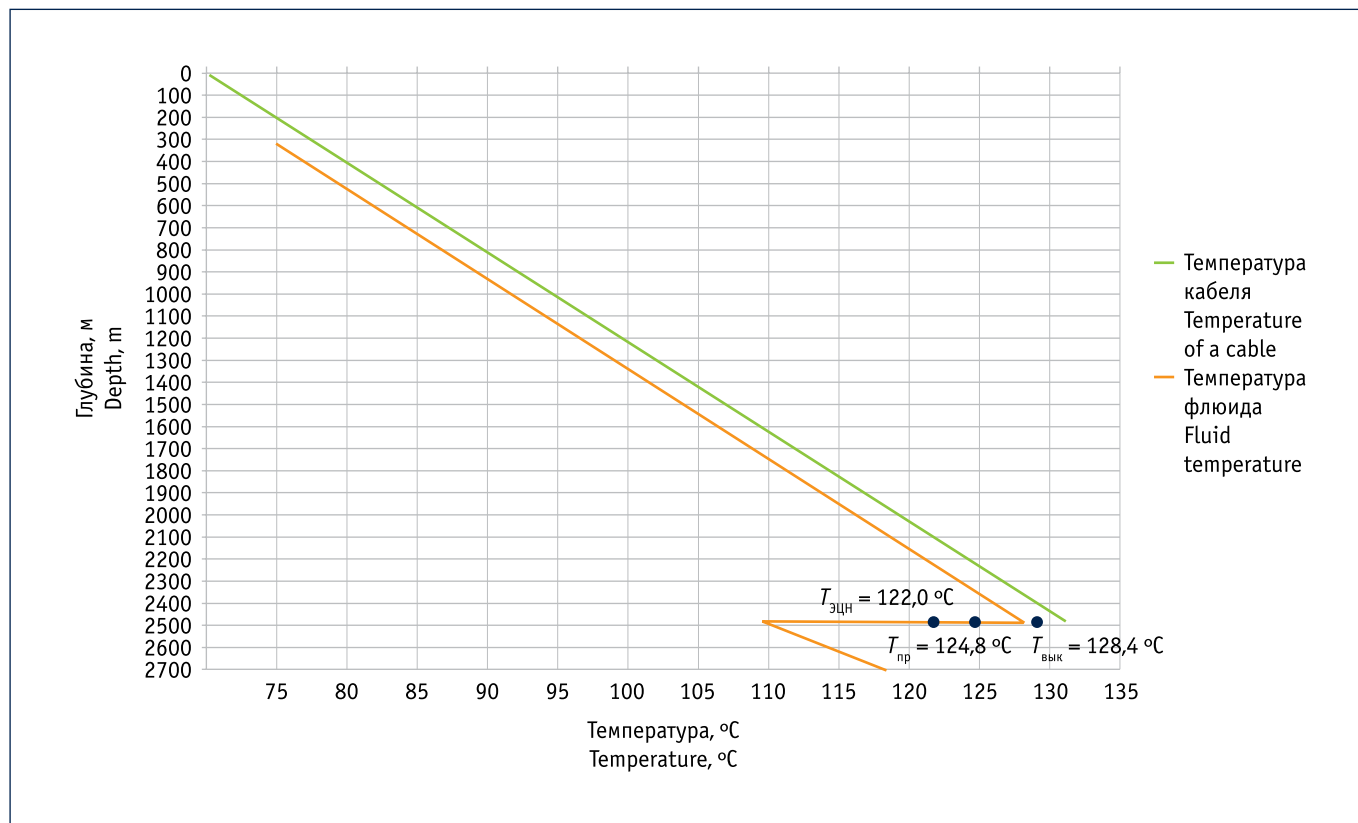


Рис. 2. Расчетный профиль температуры по скважине с установкой электроцентробежного насоса, эксплуатирующей наиболее глубоко залегающий пласт ЮК₁₁

Fig. 2. Design temperature profile of the well producing from the deepest reservoir YuK₁₁ with centrifugal motor pumping unit

выявлено, что процент отбраковки РК из ПКМ значительно превышает процент отбраковки РК из нирезиста. Из рис. 4 следует, что процент отбраковки РК из ПКМ составляет 63,9 %, при том что процент отбраковки ответной детали (НА из нирезиста) составляет лишь 34,9 %. Изложенное в работе [16] мнение о трехкратном увеличении ресурса работы НА в ЭЦН с РК из ПКМ результатами анализа не подтверждено.

При более детальном изучении выяснилось, что основная причина отбраковки РК из ПКМ заключается в абразивно-механическом износе ступицы (рис. 5). Данный вид износа с критической величиной имеют 76 % РК. Очевидно, что трибопара, состоящая из наружной поверхности ступицы РК из ПКМ и внутренней поверхности НА из нирезиста, является наиболее слабой в конструкции рабочей ступени. Большой процент отбраковки увеличивает стоимость ремонта ЭЦН с РК из ПКМ.

Как было показано в [16], удлиненная ступица рабочего колеса заменяет

собой защитную втулку вала, способствует уменьшению вибрации насоса, увеличивает площадь зацепления ступицы со шпонкой по длине шпоночного паза, исключает срез шпонки. Даже с учетом того, что вес РК из ПКМ в пять раз ниже веса РК из нирезиста, что благоприятно сказывается на снижении уровня вибрации, конструкция РК с короткой ступицей представляется менее привлекательной, т. к. требует использования защитных втулок вала. С этим утверждением согласны и производители оборудования, указывающие, что применение РК с удлиненной ступицей ввиду низкой адгезии полимерной поверхности к солям значительно уменьшает вероятность заклинивания в области радиальных пар трения, особенно при периодическом режиме эксплуатации УЭЦН, а также снижает фрикционный износ радиальных пар трения в условиях высокой (более 80 %) обводненности пластовой жидкости [4]. Вместе с тем увеличение радиальных зазоров между ступицей НА и изношен-

ной удлиненной ступицей РК из ПКМ (рис. 5) вызывает увеличение обратных перетоков, в результате которых КПД ЭЦН уменьшается. Найти оптимальное конструктивное исполнение, позволяющее снизить процент списания и недопустить повышение обратных перетоков жидкости в насосе – задача производителей оборудования. По данным дефектации, уровень осевого износа РК из ПКМ не превышает уровень износа РК из нирезиста, случаи гидроабразивного износа не зафиксированы. Деформация РК из ПКМ выявлена лишь в одном насосе, поэтому можно сделать вывод, что полифениленсульфид обеспечивает достаточную механическую прочность при температуре внутри насоса даже в условиях эксплуатации, отклоняющихся от нормальных. Еще в 1968 г. в [3] было отмечено, что снижение веса вращающейся части насоса имеет очень большое значение, поскольку ведет к уменьшению радиальных нагрузок на подшипники и улучшению условий работы вала.

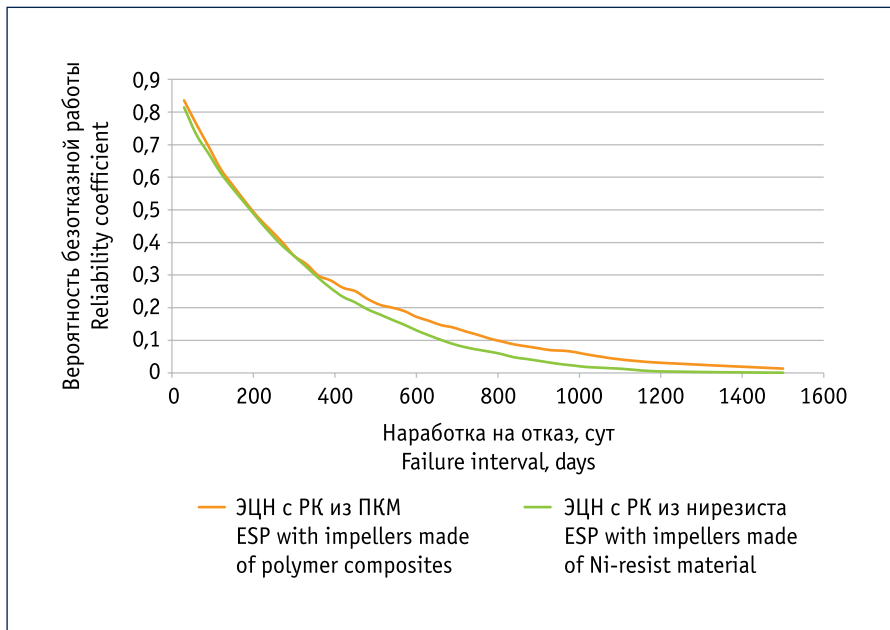


Рис. 3. Общая вероятность безотказной работы установок электроцентробежных насосов с рабочими колесами из полимерно-композитного материала и нирезиста
 Fig. 3. General probability of no-failure operation of centrifugal motor pumping units with polymer-composite and Ni-resist impellers

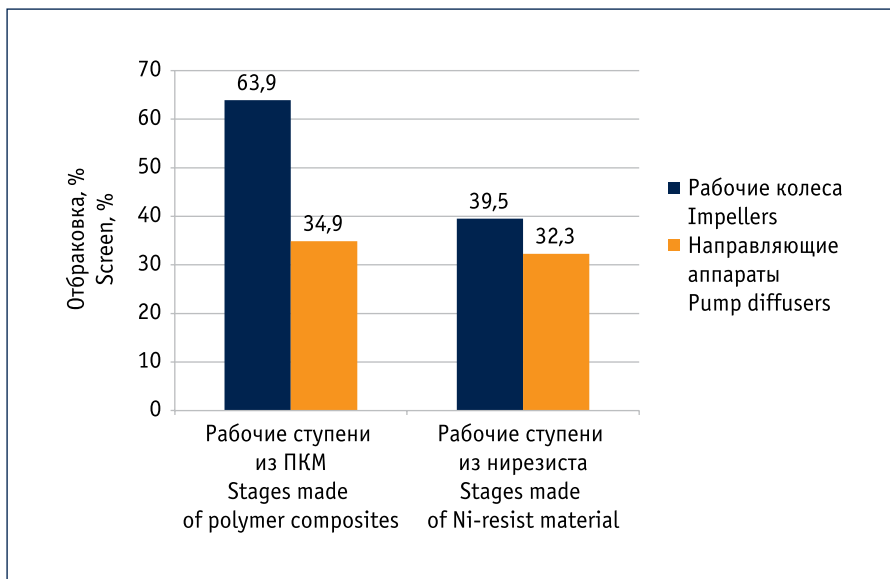


Рис. 4. Сведения по проценту отбраковки рабочих колес и направляющих аппаратов
 Fig. 4. Rejection percentage data for impellers and guide apparatus

Позволяет ли использование более легких РК из ПКМ уменьшить радиальный износ вала насоса современной конструкции с промежуточными подшипниками? Из сведений о причинах отбраковки валов, представленных в табл. 2, видно, что отбраковка из-за радиального износа ЭЦН с РК из ПКМ в 3,6 раза меньше, чем ЭЦН с РК из нирезиста. Хотя процент отбраковки валов в обоих

случаях сравнительно невелик, применение ЭЦН с РК из ПКМ позволяет в какой-то мере сократить затраты на замену данной детали при ремонте. Технологической целью использования ЭЦН с РК из ПКМ на месторождениях АО «РН-Няганьнефтегаз» является снижение или даже полное исключение случаев отказов, вызванных отложениями солей. То, что на РК из ПКМ



Рис. 5. Абразивно-механический износ ступицы рабочего колеса из полимерно-композитного материала
 Fig. 5. Abrasive-mechanical wear of the polymer-composite impeller hub

скорость солеотложения значительно меньше, чем на РК из нирезиста, было неоднократно подтверждено не только на практике. Так, специалистами ООО «РН-Уфанинефть» были проведены лабораторные эксперименты, в ходе которых было установлено, что скорость отложения солей карбоната кальция в проточной части РК из нирезиста и из ПКМ различна, причем с течением времени эта разница возрастает [6] (правда, в данной работе не приводятся результаты сравнения скорости солеотложения на НА, которые в обоих случаях изготавливаются из нирезиста). Анализ эксплуатации в АО «РН-Няганьнефтегаз» позволил установить, что доля отказов по причине солеотложения при применении ингибиторной защиты ЭЦН с РК из нирезиста и при использовании ЭЦН с РК из ПКМ без ингибиторной защиты примерно одинакова и составляет около 4–6 % всех отказов. На рис. 6 представлен пример солеотложения на РК из ПКМ.

Как было показано в [17], в настоящее время отсутствует четкое представление о деградации расходно-напорной характеристики ЭЦН в течение времени его эксплуатации. В целях определения особенностей деградации ЭЦН с РК из ПКМ была проанализирована динамика изменения подачи и давления на приеме. Анализ показал, что динамика деградации не отличается от случаев использования ЭЦН с РК из нирезиста. После относительно длительного периода нормальной эксплуатации наступает момент увеличения скорости деградации, и оборудование переходит в заключительную стадию эксплуатации. Как правило, при снижении подачи на 15–20 % при росте давления на приеме технологическая служба останавли-

Таблица 2. Причины отбраковки валов электроцентробежных насосов

Table 2. Reason of the shaft failure of ESPs

| Причина отбраковки вала насоса Reason of the pump shaft failure | ЭЦН с РК из ПКМ (698 отказов) ESP with impellers made of polymer composites (698 equipment failures) | | ЭЦН с РК из нирезиста (5331 отказ) ESP with impellers made of Ni-resist material (5331 equipment failures) | |
|--|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| | Кол-во случаев Number of cases | % отбраковки Reject percentage, % | Кол-во случаев Number of cases | % отбраковки Reject percentage, % |
| Вал деформирован Pump shaft deformation | 3 | 0,4 | 18 | 0,3 |
| Вал изношен Pump shaft depreciation | 10 | 1,4 | 266 | 5,0 |
| Вал сломан Fail of the pump shaft | 3 | 0,4 | 48 | 0,9 |
| Всего отбраковок вала Total pump shaft failures | 16 | 2,3 | 332 | 6,2 |

ваит УЭЦН для замены. На рис. 7 представлен пример длительного периода нормальной работы ЭЦН с РК из ПКМ и начала резкой деградации расходно-напорной характеристики. Нароботка УЭЦН составила 636 сут, причина остановки – снижение подачи. Данный факт объясняется увеличением перетоков вследствие увеличения радиальных и осевых зазоров.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

В 1970-х гг. в особом конструкторском бюро бесштанговых насосов (ОКББН) было установлено, что шероховатость поверхности РК и НА влияет на КПД ЭЦН. Уменьшение шероховатости каналов РК с Rz 160–80 до 40–20 без каких-либо конструктивных изменений приводит к повышению КПД на 3–4 %. Благодаря очень хорошей текучести полифениленсульфид является удачным материалом для изготовления тонкостенных или сложных с геометрической точки зрения литьевых изделий [15]. Технология изготовления РК и уникальные свойства материала позволяют добиться меньшей шероховатости поверхности [4], не превышающей Rz 5–6. Имея значительно более низкую шероховатость, ЭЦН с РК из ПКМ должны были бы иметь и более высокий КПД по сравнению с ЭЦН с РК из нирезиста, что могло бы дать им значительное преимущество, однако этого пока не произошло. Лишь в отдельных случаях КПД ряда моделей ЭЦН с РК из ПКМ и лучших

моделей ЭЦН с РК из нирезиста имеют равные значения. В большинстве же случаев КПД ЭЦН с РК из ПКМ немного ниже.

ПРОБЛЕМА УТИЛИЗАЦИИ

Как было справедливо отмечено в [2], к числу проблем применения деталей из полимеров относится проблема экологическая. В рекламных проспектах производители ЭЦН с РК из ПКМ умалчивают о сложностях с утилизацией отработавших РК из ПКМ. Если НА и РК из нирезиста после списания легко реализуются, т. е. обеспечивается возврат средств, то утилизация РК из ПКМ, напротив, требует дополнительных затрат. И по мере увеличения объемов использования оборудования из ПКМ проблема утилизации будет обостряться. Во многих удаленных регионах добычи нефти просто отсутствуют подрядчики, предоставляющие услуги по утилизации ПКМ. Наиболее целесообразным решением данной задачи, по мнению авторов статьи, является возложение на производителей обязанности вывозить отработанные детали из ПКМ и освоить технологию, позволяющую их перерабатывать и использовать повторно. В противном случае может повториться ситуация с проектом внедрения труб и штанг из ПКМ, когда из-за проблем с утилизацией оборудования из ПКМ нефтегазодобывающие предприятия предпочли вернуться к использованию оборудования из традиционных материалов.



Рис. 6. Солеотложения на рабочем колесе из полимерно-композитного материала
Fig. 6. Scales of the polymer-composite impeller

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С РАБОЧИМИ КОЛЕСАМИ ИЗ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Главной целью широкомасштабных промышленных экспериментов по применению ЭЦН с РК из ПКМ вместо ЭЦН с РК из нирезиста является поиск путей возможного снижения совокупных затрат на эксплуатацию скважин в условиях солеотложения.

Традиционной технологией предотвращения солеотложения является ингибиторная защита, которая может быть реализована путем периодического долива реагента в затрубное пространство с использованием передвижного комплекса либо с помощью закачки реагента с использованием дозатора. Следует отметить, что на рынке присутствует большое количество производителей химреагентов и сервисных компаний, оказывающих услуги в области ингибиторной защиты. Следствием высокой конкуренции является сравнительно низкая стоимость как самих реагентов, так и сервисных услуг по их закачке и обслуживанию дозаторов.

На рис. 8 представлено сравнение структур основных затрат за три года эксплуатации скважин с применением ЭЦН с РК из нирезиста и с РК из ПКМ с подачей 125 м³/сут. Для данного насоса производителям удалось разработать ступень удачной конструкции и реализовать преимущества ПКМ.



Society of Petroleum Engineers

РОССИЙСКАЯ НЕФТЕГАЗОВАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ SPE

Крупнейшее нефтегазовое мероприятие SPE в регионе

22–24 октября 2019

“Холидей Инн Сокольники”
Москва, Россия

Регистрация откроется 1 июня 2019

Следите за обновлением информации на сайте go.spe.org/19rptc-ru.

ЗОЛОТЫЕ СПОНСОРЫ



СПОНСОР МОБИЛЬНОГО
ПРИЛОЖЕНИЯ



Стремимся
к большему!

СПОНСОР ПАКЕТА
ДЕЛЕГАТА

HALLIBURTON

СПОНСОР
БЕЙДЖЕЙ



СПОНСОР
РЕГИСТРАЦИИ

Schlumberger



По всем вопросам обращайтесь к нам по электронной почте russianoilandgas@spe.org,
тел.: +7(495) 268-04-54.



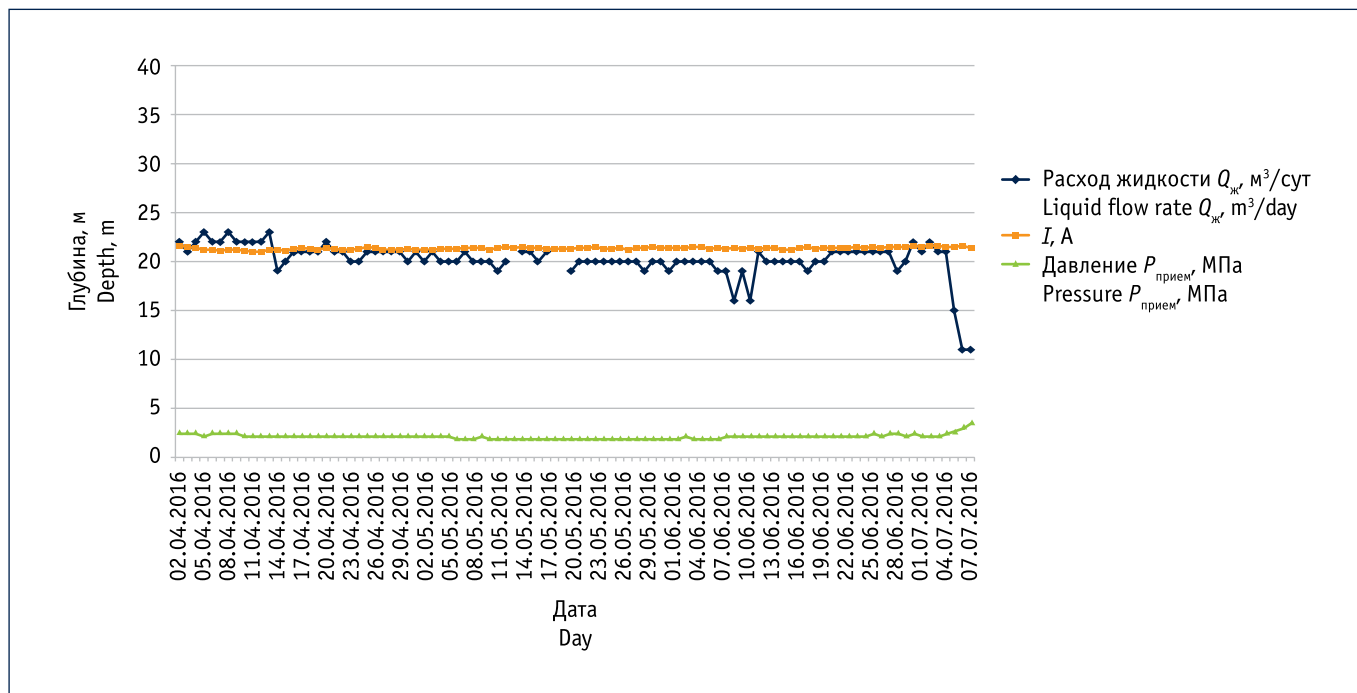


Рис. 7. Пример начала резкой деградации расходно-напорной характеристики после длительного периода нормальной работы электроцентробежного насоса с рабочим колесом из полимерно-композитного материала

Fig. 7. The example of rapid flow-head degradation onset following long normal operation of a centrifugal motor pump with the polymer-composite impeller

Благодаря этому КПД насоса составил 60 %, что превышает ближайший аналог ЭЦН с РК из нирезиста на 3,5 %. Поскольку КПД ЭЦН выше, достигается заметная экономия электроэнергии. Из представленных данных видно, что закупочная цена ЭЦН с РК из ПКМ в комплекте с электродвигателем и газосепаратором превышает стоимость ЭЦН с РК из нирезиста. Эксплуатация скважины, на которой уже установлен дозатор химреагентов, с помощью ЭЦН с РК из нирезиста сопряжена с расходами на обслуживание дозатора и закупку ингибиторов солеотложения. На рис. 8 также показан вариант, когда требуется закупка дозатора и его монтаж. Отказ от использования ингибиторной защиты дает сравнительно небольшой эффект в плане сокращения расходов. Кроме того, фактором, снижающим экономическую эффективность применения ЭЦН с РК из ПКМ, являются более высокие затраты на ремонт по причине большего процента списания рабочих ступеней насоса. Расчеты, выполненные с использованием технико-экономической модели оценки способов механизированной добычи ПАО «НК «Роснефть»,

показывают, что вариант применения ЭЦН с РК из ПКМ с отказом от применения ингибиторов солеотложения позволяет сократить затраты по сравнению с вариантом использования ЭЦН с РК из нирезиста с закупкой дозатора химреагентов.

ВЫВОДЫ

Комплексный анализ позволяет сделать следующие выводы по перспективам использования ЭЦН с РК из ПКМ на месторождениях ПАО «НК «Роснефть».

По технологической эффективности

1. Общая надежность ЭЦН с РК из ПКМ в условиях эксплуатации хорошо сценарированных пластов с терригенным коллектором сопоставима с общей надежностью ЭЦН с РК из нирезиста. Не зафиксированы случаи гидроабразивного износа РК из ПКМ, а также случаи их деформации. Уровни осевого износа РК из ПКМ и из нирезиста сопоставимы. Это заключение позволяет сделать вывод о достаточной износостойчивости и наличии технологической возможности использования ЭЦН с РК из ПКМ при эксплуатации значи-

тельной части месторождений Западной Сибири с аналогичными коллекторами.

2. Применение ЭЦН с РК из ПКМ позволяет сократить количество отказов из-за отложения солей без применения ингибиторной защиты. Однако эффект снижения скорости солеотложения требует более детального изучения и, скорее всего, будет различным на разных месторождениях. Вместе с тем стоит отметить, что в плане снижения затрат эффект от отказа проведения ингибиторной защиты будет сравнительно небольшим.

3. Процент отбраковки РК из ПКМ при ремонте ЭЦН значительно превышает процент отбраковки РК из нирезиста по причине возникновения абразивно-механического износа удлиненной ступицы. В то же время случаев торможения быстрой деградации расходно-напорной характеристики ЭЦН по причине увеличения обратных перетоков не зафиксировано.

По перспективам применения

1. Основным резервом повышения экономической эффективности применения ЭЦН с РК из ПКМ является сниже-

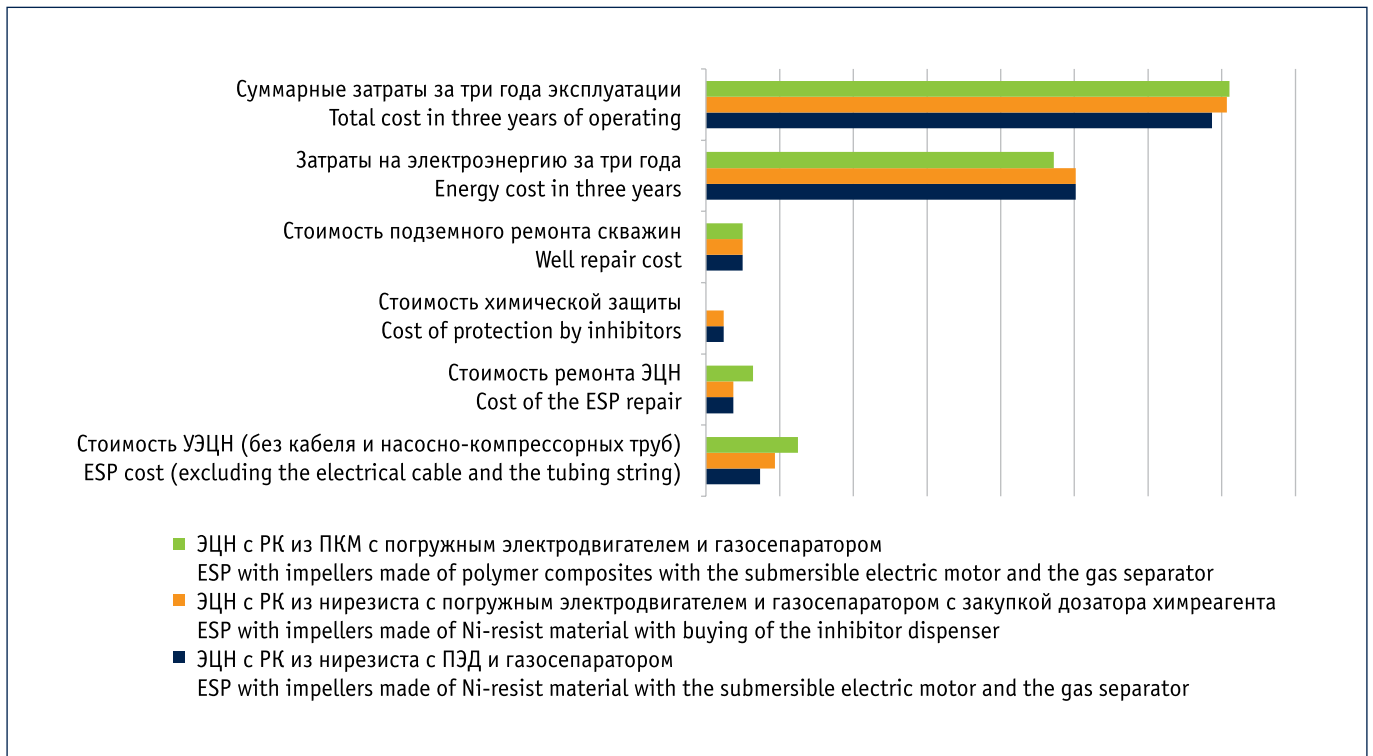


Рис. 8. Основные затраты (выборочные сведения) на эксплуатацию электроцентробежных насосов производительностью 125 м³/сут за три года, тыс. руб.
Fig. 8. Capital costs (sample data) for operation of centrifugal motor pumps with the delivery of 125 m³/day in three years, thsd Rubles

ние высокой стоимости оборудования, уровень которой сформировался в силу отсутствия конкуренции производителей. В целях снижения стоимости оборудования необходимо развивать рынок поставщиков, что возможно лишь в условиях постепенного увеличения спроса нефтегазодобывающих предприятий на продукцию. Возможным резервом снижения стоимости оборудования является также переход на использование отечественных ПКМ, производство которых недавно было налажено в РФ.

2. Значительным резервом усиления конкурентоспособности ЭЦН с РК из ПКМ, позволяющим повысить заинтересованность нефтегазодобывающих предприятий, является разработка оборудования с большим КПД за счет использования технологических преимуществ ПКМ, позволяющих изготавливать детали с меньшей шероховатостью. Пока данное преимущество реализовано лишь в единичных моделях выпускаемых насосов.

3. Разработка ступеней насосов, позволяющих уменьшить абразивно-механический износ ступиц РК и тем са-

мым сократить процент их отбраковки при ремонте оборудования, является технической задачей для конструкторов. 4. Разработка и начало применения производителями оборудования технологии повторного использования ПКМ позволит нефтегазодобывающим компаниям снизить стоимость жизненного цикла его эксплуатации, а также исключить риски возникновения экологических проблем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование технологий механизированной добычи – сложный и длительный процесс, в ходе которого появляются и проходят испытания новые революционные идеи, но чаще это этапы эволюционного развития, заключающегося в постепенной доработке применяемого оборудования. Поскольку в этот процесс вовлечено большое число промысловых инженеров, обсуждение реально полученных результатов представляет значительный интерес и порождает новые дискуссии. Безусловно, переход от использования традиционных материалов к применению ПКМ как общая тенденция в тех-

нике и применение ЭЦН с РК из ПКМ как частный случай имеют большие перспективы с позиций эволюционного пути развития. В данной статье авторы отразили лишь часть проблем такого перехода, описав имеющиеся положительные и отрицательные стороны применения ЭЦН с РК из ПКМ и показав, что весь потенциал ПКМ еще не реализован. Специалисты ПАО «НК «Роснефть» планируют продолжить работу по испытанию партий оборудования всех производителей и ускорению создания условий конкуренции в данном секторе. Планируются испытания партий ЭЦН с РК из ПКМ в условиях, позволяющих реализовать их дополнительные преимущества. Кроме того, будет продолжен анализ эффективности работы данного оборудования в разных эксплуатационных условиях. Таким образом, авторы статьи представили свой взгляд на непростую проблему и предлагают инженерам, работающим в других нефтегазодобывающих компаниях, производителям оборудования и специалистам научных учреждений поучаствовать в обсуждении проблемы.

Литература:

1. Сутягин В.М., Кукурина О.С., Бондалетов В.Г. Основные свойства полимеров: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 96 с.
2. Бузник В.М. Фторполимерные материалы: применение в нефтегазовом комплексе. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2009. 31 с.
3. Богданов А.А. Погружные центробежные электронасосы для добычи нефти (расчет и конструкция). М.: Недра, 1968. С. 71–72.
4. Меркушев Ю.М. Низкоадгезионные электроцентробежные насосы. Эксплуатационная и экономическая эффективность применения // Нефтегазовая вертикаль. 2011. №12. С. 76–78.
5. Мальцев П.А. Испытания электроцентробежных насосов с рабочими колесами из жидко-кристаллических полимеров на фоне скважин, осложненных солеотложениями // Инженерная практика. 2017. №3. С. 32–34.
6. Меркушев Ю.М., Кошкин Д.В. Технология прерывистой обработки ингибитором скважин солевого фонда // Экспозиция Нефть Газ. 2011. №6 (18). С. 51–52.
7. Меркушев Ю.М. Установки электроцентробежных насосов для добычи вязких жидкостей // Нефтегазовая вертикаль. 2014. №20 (345). С. 50–52.
8. Лавриненко Т.В., Седых Б.Н., Монаков А.С. Эффективное использование полимерных материалов в промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №2. С. 350–356.
9. Круглов С.В. Работа деталей установок электроцентробежных насосов с полимерными защитными покрытиями // Инженерная практика. 2010. №6. С. 105–109.
10. Пятлов И.С. Рабочие ступени из органических керамикоподобных материалов для осложненного фонда скважин // Инженерная практика. 2013. №1. С. 8–11.
11. Pena A., Hobgood D., Stewart E., Bentley G., Garrett M. Using coatings to improve ESP well performance // Proceedings of the Forty-Ninth Annual Southwestern Petroleum Short Course. 2002. P. 101–104.
12. Якимов С.Б. Индекс агрессивности выносимых частиц на месторождениях ТНК-ВР в Западной Сибири // Нефтепромысловое дело. 2008. №9. С. 33–39.
13. Takacs G. Electrical Submersible Pump Manual. Gulf Professional Publishing, 2009. 440 p.
14. Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Донской Ю.А., Якимов С.Б. Влияние растворенного углекислого газа на выпадение карбонатов при добыче нефти с применением электроцентробежных насосов // Нефтяное хозяйство. 2010. №1. С. 88–89.
15. Йохэннинг Ф. Полифениленсульфид – производство, применение, перспективы // Полимерные материалы. Изделия, оборудование, технологии. 2012. №12. С. 40–44.
16. Вагапов С.Ю., Жулаев В.П., Лягов А.В. и др. Скважинные насосные установки для добычи нефти: учеб. пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. С. 91.
17. Якимов С.Б., Каверин М.Н., Тарасов В.П. и др. Исследование закономерностей деградации подачи установок электроцентробежных насосов при эксплуатации Самотлорского месторождения // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2016. №3 (44). С. 83–87.

References:

1. Sutyagin V.M., Kukurina O.S., Bondaletov V.G. Basic Polymer Properties. Textbook. Tomsk: Tomsk Polytechnical University Press; 2010. (In Russ.)
2. Buznik V.M. Polymeric Fluorine Materials: Application in Oil-And-Gas Complex. Moscow: Oil and Gas Publ. of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas; 2009. (In Russ.)
3. Bogdanov A.A. Submersible Centrifugal Motor Pumps for Oil Production (Design and Configuration). Moscow: Nedra; 1968. (In Russ.)
4. Merkushev Yu.M. Low Adhesive Centrifugal Motor Pumps. Operating and Cost Efficiency of Application. Neftegazovaya vertikal' [Oil and Gas Vertical]. 2011;12:76–78. (In Russ.)
5. Maltsev P.A. The Tests of Centrifugal Motor Pumps with Impellers of Mesomorphic Polymers in the Well Stock Scales-Complicated. Inzhenernaya praktika [Engineering Practice]. 2017;3:32–34. (In Russ.)
6. Merkushev Y.M., Koshkin D.V. Technology Intermittent Treatment of Inhibitor in Salt Wells Fund. Expositisia Neft' Gaz [Exposition Oil & Gas]. 2011;6(18):51–52. (In Russ.)
7. Merkushev Yu.M. Centrifugal Motor Pumping Units for Recovery of Viscous Fluids. Neftegazovaya vertikal' [Oil-and-Gas Vertical]. 2014;20(345): 50–52. (In Russ.)
8. Lavrinenko T.V., Sedykh B.N., Monakov A.S. Effective Application of Polymeric Materials in Industry. Gorny informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2015;2:350–356. (In Russ.)
9. Kруглов S.V. Component Operation of the ESP Unit With Polymer Protective Coating. Inzhenernaya praktika [Engineering Practice]. 2010;6:105–109. (In Russ.)
10. Pyatov I.S. Working Stages Made of Organic Materials Similar to Ceramics for the Complicated Well Stock. Inzhenernaya praktika [Engineering Practice]. 2013;1:8–11. (In Russ.)
11. Pena A., Hobgood D., Stewart E., Bentley G., Garrett M. Using coatings to improve ESP well performance. Proceedings of the Forty-Ninth Annual Southwestern Petroleum Short Course; 2002. P. 101–104.
12. Yakimov S.B. Aggressiveness Index of Transported Particles in the Fields of TNK-BP in West Siberia. Neftepromyslovoe delo [Oilfield Engineering]. 2008;9:33–39. (In Russ.)
13. Takacs G. Electrical Submersible Pump Manual. Gulf Professional Publishing, 2009.
14. Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Donskoy Yu.A., Yakimov S.B. Effect of Dissolved Carbon Dioxide on Carbonate Deposition at Oil Recovery with the Use of Electric Centrifugal Pumps. Neftyanoe khozyaistvo [Oil Industry]. 2010;1:88–89. (In Russ.)
15. Johaenning F. Polyphenylene Sulfide: Production, Applications, Prospects. Polimernye materialy. Izdeliya, oborudovanie, tekhnologii [Polymer Materials. Products, Equipment, Technology]. 2012;12:40–44. (In Russ.)
16. Vagapov S.Yu., Zhulayev V.P., Lyagov A.V., et al. Oil-Well Pumping Units for Oil Production. Textbook. Ufa, Ufa State Oil Technical University; 2003. (In Russ.)
17. Yakimov S.B., Kaverin M.N., Tarasov V.P., et al. Research of Mechanisms Of ESP Flow Rate Decline in Operation of Wells at Samotlor Field. Nauchno-tekhnicheskii vestnik OAO "NK "Rosneft" [Rosneft Research and Technology Bulletin]. 2016;3(44):83–87. (In Russ.)