

УДК 66.094.552+622.276.53

С.Б. Якимов¹, e-mail: s_yakimov@rosneft.ru; А.П. Фирсов²; Э.А. Гебель²; А.А. Ежов²; С.Г. Цих³

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

² ПАО «Варьеганнефтегаз» (Радужный, Россия).

³ АО «НПО «ЦНИИТМАШ» (Москва, Россия).

Результаты промышленного испытания электроцентробежного насоса с упрочненными борированием рабочими ступенями на Ван-Еганском месторождении

Непрерывное усложнение условий эксплуатации скважин при учете необходимости снижения затрат на добычу нефти обуславливает актуальность применения химико-термических обработок для упрочнения рабочих ступеней электроцентробежных насосов. В целях определения технической эффективности упрочнения рабочих ступеней был проведен промышленный эксперимент по использованию насоса с установленными на валу поочередно ступенями стандартными и подвергнутыми жидкостному борированию. Испытания прошли на скважине, эксплуатирующей пласт покурской свиты Ван-Еганского нефтяного месторождения (Нижневартовский р-н Западной Сибири). Эксплуатация скважины осложнена повышенной концентрацией абразивных частиц в добываемой продукции. Результаты замеров поверхностей направляющих аппаратов и рабочих колес насоса по истечении 213 сут показали меньший износ деталей, подвергнутых борированию. Средние значения коэффициентов технической эффективности применения технологии жидкостного борирования составили для направляющих аппаратов и рабочих колес насоса 2,51 и 2,28 соответственно. Все необработанные детали подлежали списанию, в то время как детали, подвергнутые жидкостному борированию, хотя и имели износ, однако были пригодны для повторного использования. Принятие окончательного решения по тиражированию технологии в масштабах ПАО «НК «Роснефть» возможно после проведения испытаний опытной партии электроцентробежных насосов с борированными рабочими ступенями в целях подтверждения на практике возможности увеличения наработки на отказ, эксплуатации скважин с большей депрессией на пласт, а также определения области технико-экономической целесообразности применения данной технологии.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, жидкостное борирование, электроцентробежный насос, рабочая ступень, повышение износоустойчивости, осложненные условия эксплуатации скважин, вынос песка.

.....

S.B. Yakimov¹, e-mail: s_yakimov@rosneft.ru; A.P. Firsov²; E.A. Gebel²; A.A. Yezhov²; S.G. Tsikh³

¹ Rosneft PJSC (Moscow, Russia).

² Varyeganneftegaz PJSC (Raduzhny, Russia).

³ RPA "CNIITMASH" JSC (Moscow, Russia).

Field Test Results of an Electric Submersible Pump with Borated-Hardened Working Stages at the Van-Yeganskoye Field

The continuous complication of well operating conditions, taking into account the need to reduce oil production costs, stipulates the relevance of the use of chemical and thermal treatments to strengthen the working stages of electric submersible pumps. In order to determine the technical efficiency of working stages hardening, a field experiment was conducted on the use of a pump with standard stages installed on the shaft in turn and subjected to liquid boration. The tests were performed at a well operating the Pokurskaya formation of the Van-Yeganskoye oil field (Nizhnevartovsky district of Western Siberia). The operation of the well is complicated by an increased concentration of abrasive particles in the extracted products. The results of measurements of the surfaces of the guide devices and impellers of the pump after 213 days showed less wear of the borated parts. The average values of the technical efficiency coefficients for the application of liquid boration technology were 2.51 and 2.28, respectively, for the guide devices and impellers of the pump. All untreated parts were subject to write-off, while the borated parts, although they were worn out, were suitable for reuse. The final decision on replicating the technology on the scale of Rosneft PJSC may be made after testing a pilot batch of electric submersible pumps with borehole operating stages in order to confirm in practice the possibility

of increasing the time to failure, operating wells with a greater depression on the reservoir, as well as determining the technical and economic feasibility of using this technology.

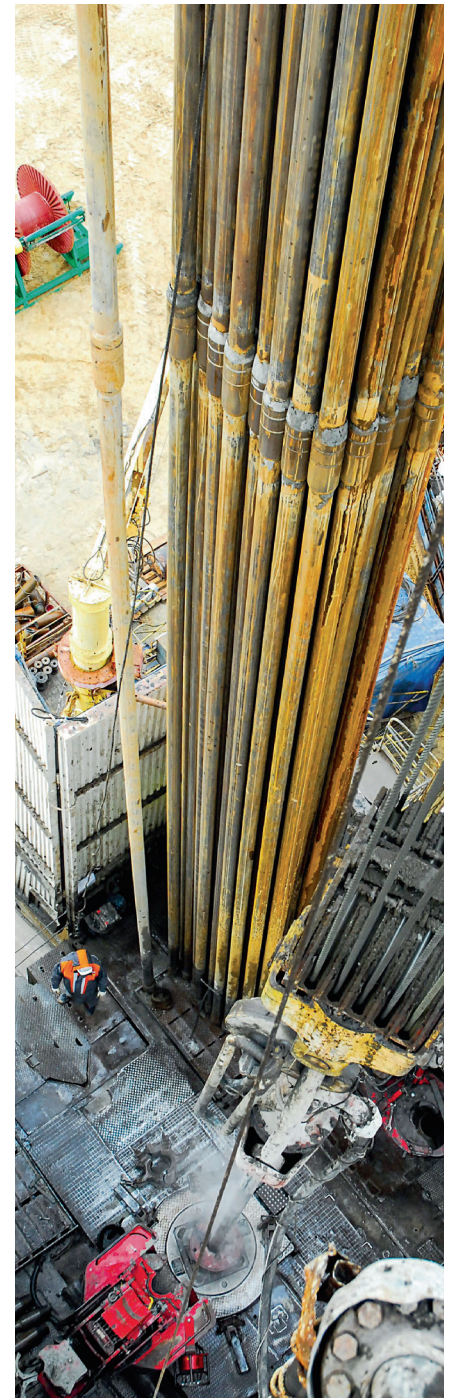
Keywords: chemical-thermal treatment, liquid borating, electric submersible pump, working stage, increased wear resistance, complicated well operating conditions, sand removal.

Возможность насыщения поверхности металла бором [1], впервые доказанная русским ученым Н.П. Чижевским в 1915 г., нашла широкое применение в машиностроении. Так, на сегодняшний день активно используется упрочнение деталей машин с помощью различных методов химико-термической обработки (ХТО), включая борирование. Обработкам подвергается широкий спектр металлов и сплавов для придания им таких специальных свойств, как усталостная прочность, износ-, коррозионно- и жаростойкость. Значимым фактором при этом является то, что за счет ХТО дефицитные металлы можно заменять на более дешевые, легируя их поверхность [1].

В то же время добиться сколько-нибудь значимого повышения ресурса оборудования в результате применения различных методов ХТО для упрочнения поверхности направляющих аппаратов (НА) и рабочих колес (РК) погружных электроцентробежных насосов (ЭЦН), применяемых для добычи из скважин жидкости, содержащей абразивные частицы, долгое время не удавалось, несмотря на то что такие попытки предпринимались неоднократно. Это связано прежде всего с тем, что твердость абразивных частиц, присутствующих в пластовой жидкости, значительно превышает твердость поверхности НА и РК, обработанных с применением технологий азотирования, карбонитрирования, объемной термообработки и др. К примеру, твердость кварцевого песка – наиболее распространенных абразивных частиц в пластовой жидкости – составляет 1240–1280 HV, а твердость поверхности НА и РК после указанных видов термической и химико-термической обработки не превышает

1100 HV. Поэтому износ НА и РК протекает по механизму микрорезания, и скорость его в значительной степени определяется количеством абразивных частиц в пластовой жидкости и их кинетической энергией. Для того чтобы износ НА и РК проходил по усталостному механизму (с максимальной износоустойчивостью), как минимум необходимо, чтобы твердость поверхности была выше твердости абразивных частиц. Из всех технологий ХТО этому критерию соответствует только борирование – твердость борированного слоя может достигать 2500 HV.

В российской и в зарубежной технической литературе сведения о промышленном применении данной технологии и о результатах ее испытаний на отдельных скважинах отсутствуют. Можно встретить лишь упоминание о наличии технологии борирования рабочих ступеней (РС) у компании Wood Group ESP (США) [2]. Не лучше обстоят дела и с публикацией сведений о результатах стендового тестирования технологической эффективности борированных РС ЭЦН. Единственным предприятием, специалисты которого не только разработали технологию упрочнения поверхности деталей ЭЦН методом жидкостного борирования в расплавах солей с последующей термообработкой, но и опубликовали результаты сравнительных стендовых испытаний, стал Государственный научный центр Российской Федерации АО «НПО «ЦНИИТМАШ» [3]. Испытания, в частности, показали, что износостойчивость РС из материала нирезист тип 1, подвергнутых борированию, увеличилась в четыре раза по сравнению со стандартными деталями из того же материала, не подвергнутыми упрочнению. Коррозионная



Ссылка для цитирования (for citation):

Якимов С.Б., Фирсов А.П., Гебель Э.А., Ежов А.А., Цих С.Г. Результаты испытания электроцентробежного насоса с упрочненными борированием рабочими ступенями на Ван-Еганском месторождении // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2020. № 7–8. С. 56–62.
Yakimov S.B., Firsov A.P., Gebel E.A., Yezhov A.A., Tsikh S.G. Field Test Results of an Electric Submersible Pump with Borated-Hardened Working Stages at the Van-Yeganskoye Field. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2020;(7–8):56–62. (In Russ.)

стойкость борированного слоя в специальных средах, имитирующих пластовую жидкость (водный раствор 5 % NaCl + 3 % HCl) и жидкости для удаления солеотложений в насосе (водный раствор 10 % HCl), повысилась в 4 и 10 раз соответственно. Установлено, что в результате обработки в рациональных режимах на поверхности НА и РК формируется упрочненный слой толщиной 50–55 мкм твердостью 1800–1900 HV_{0,1}, состоящий из двух фаз – FeV и Fe₂V (рис. 1). Твердость сердцевины составила 260–270 HV_{0,1}.

Ввиду непрерывного усложнения условий эксплуатации скважин на фоне необходимости снижения затрат на добычу нефти тема применения ХТО для упрочнения РС ЭЦН не теряет своей актуальности. Данную точку зрения разделяют многие исследователи [3, 4]. Специалисты ПАО «НК «Роснефть», постоянно осуществляющие поиск и внедрение технологий повышения эффективности механизированной добычи нефти, также рассматривают методы ХТО поверхности РС ЭЦН в качестве потенциально перспективных технологий. Однако на сегодняшний день полностью отсутствуют сведения о технологической и экономической эффективности применения ЭЦН с борированными РС в конкретных скважинных условиях. Минимальными сведениями для принятия решения о применении даже небольшой партии ЭЦН с деталями, упрочненными методами ХТО, должны быть достигаемая технологическая эффективность в области снижения износа деталей и возможное увеличение наработки на отказ по сравнению с применяемым стандартным оборудованием. На основании данных показателей с учетом стоимости ХТО и замены отбракованных при ремонте деталей можно уже рассчитать экономическую целесообразность применения технологии в конкретных скважинных условиях. В связи с изложенным и с учетом положительных результатов стендовых испытаний РС, обработанных с применением технологии «Рубор» (жидкостного безэлектролизного борирования), было принято решение о проведении опытно-промышленных испытаний ЭЦН с борированными НА и РК. Целью испытаний

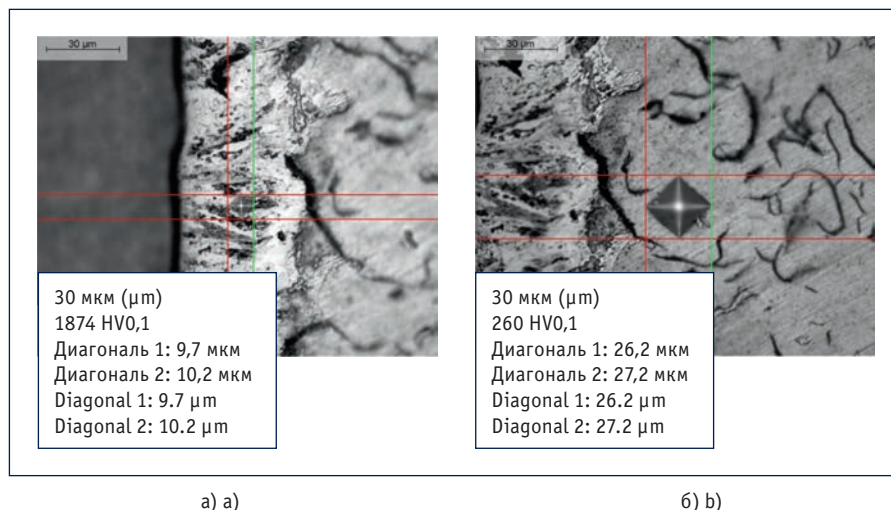


Рис. 1. Микроструктура и твердость борированного слоя (а) и сердцевины (б), полученных на нирезисте после обработки по технологии «Рубор» (жидкостного безэлектролизного борирования)

Fig. 1. Microstructure and hardness of the borated layer (a) and the core (b) obtained on the nirezist after processing by the Rubor technology (liquid electrolysis-free boration)

было определение уровня снижения износа борированных РС по сравнению со стандартными. Рассмотрим результаты испытания ЭЦН в скважине, эксплуатирующей пласт покурской свиты Ван-Еганского месторождения, расположенного в Нижневартовском районе Западной Сибири.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНО-ПРОМЫСЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Группа пластов покурской свиты характеризуется низкой сцементированностью и высокой проницаемостью коллекторов. На Ван-Еганском месторождении пласты данной группы эксплуатируют 52 скважины со средней глубиной по вертикали до верхних дыр перфорации 1327 м. Эксплуатация скважин ведется с применением ЭЦН и осложнена выносом алевролитовых и песчаных фракций песка со средним диаметром зерен 0,15 мм, обладающих высоким индексом агрессивности – 70 [5]. Концентрация абразивных частиц в добываемой жидкости, включающих кварц, плагиоклаз и обломки горных пород, варьирует в пределах 35–250 мг/л. Фиксируются также залповые выбросы пластового песка, при которых его концентрация в жидкости превышает несколько тысяч миллиграммов на литр. Наиболее частой причиной смены ЭЦН являются параметрические отказы, свя-

занные со снижением подачи насоса по причине износа, или функциональные отказы, обусловленные засорением песком. Средний дебит жидкости составляет 239 м³/сут и обеспечивается ЭЦН с РС двухпорной конструкции из материала нирезист тип 1 с плавающими колесами.

Основной способ снижения интенсивности износа ЭЦН, применяемый специалистами ПАО «Варьеганнефтегаз», – эксплуатация на пониженных частотах. По состоянию на 01.01.2020 г. установки ЭЦН эксплуатировались при средней частоте 43,8 Гц. Средняя наработка ЭЦН на отказ составляет около 370 сут, что не является хорошим показателем. В целом применение способа эксплуатации ЭЦН на пониженных частотах позволяет снизить скорость износа и тем самым несколько увеличить ресурс работы оборудования. Однако такой способ требует использования насосов с большим числом РС, т. е. оборудования с немного большей начальной стоимостью, а также затратами на ремонт по сравнению с вариантом эксплуатации при частоте 50 Гц. В части скважин используются погружные сепараторы песка, но эти устройства не позволяют полностью защитить насос от абразивных частиц. Технологии химического закрепления призабойной зоны отличаются высокой стоимостью



Новая технологическая линия по ремонту насосных штанг TMC-SRLine™



Основные участки технологической линии:



Выбери умные технологии!



Характеристики линии:



Оптимальное планировочное решение.



Обслуживающий персонал

Возможности линии:



Проектирование любого типа моечных агрегатов



Подбор метода анализа состояния тела штанги:
• акустический;
• электро-магнитный;
• магнитно-порошковый.



Вытягивание тела штанги до достижения предела текучести



Маркировка штанг осуществляется лазером

Преимущества:



Высокая производительность линии



Широкая номенклатура обрабатываемых насосных штанг всех групп прочности



Оперативное развертывание производства



Упаковка насосных штанг в технологические транспортировочные кассеты

и ограниченным сроком эффективного защитного действия, поэтому используются только в скважинах с наибольшим разрушением коллектора. Хорошую технологическую эффективность показал опыт применения ЭЦН с РС из материала нирезист тип 4 [6], однако стоимость такого оборудования высока, и технология не начала тиражироваться. В целях снижения выноса абразивных частиц из пласта часть скважин эксплуатируется с пониженной депрессией на пласт, но этот метод приводит к небольшим потерям в добыче нефти.

Таким образом, поиск технологий, позволяющих снизить стоимость добычи нефти в условиях присутствия абразивных частиц, является для инженеров ПАО «Варьеганнефтегаз» актуальной задачей.

Поскольку испытания ЭЦН, состоящего только из упрочненных РС, не позволили бы определить коэффициент повышения износоустойчивости по сравнению с применением стандартных, не упрочненных РС, было принято решение о комбинированной сборке насоса. Упрочненные и неупрочненные РС были установлены на валу по большей части поочередно. Опытный образец ЭЦН с номинальной подачей 650 м³/сут с РС двухопорной конструкции из материала нирезист тип 1 с плавающими ступенями был собран из 42 борированных и 30 неборированных РС. Данный ЭЦН, смонтированный на одной из скважин, эксплуатирующих пласт покурской свиты, отработал в нормальном режиме в течение 213 сут и был поднят исправным в целях определения уровня износа РС. Решение об остановке и извлечении ЭЦН было вызвано тем, что в случае наработки более 365 сут РС обычно подвержены значительному износу и даже частичному разрушению. Это обстоятельство затруднило бы оценку коэффициента технической эффективности применения технологии жидкостного борирования.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Коэффициент технической эффективности применения технологии жидкостного борирования было решено рассчитывать по формуле:

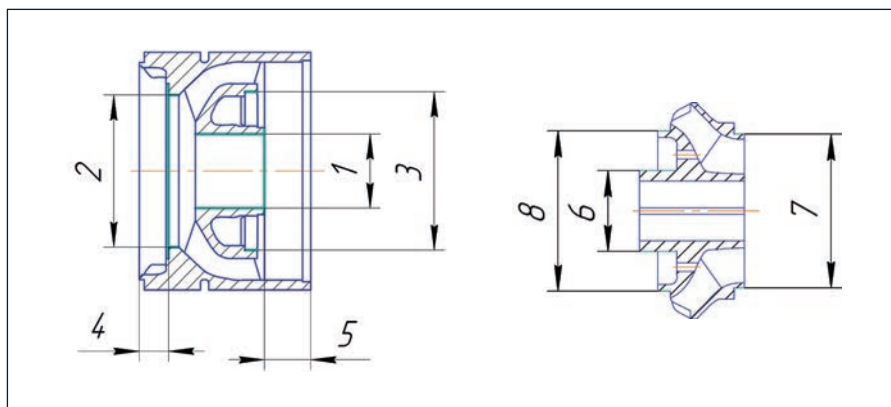


Рис. 2. Контролируемые размеры: а) направляющих аппаратов; б) рабочих колес:

1 – внутренняя поверхность ступицы аппарата; 2 – внутренняя поверхность входа в каналы; 3 – поверхность проточки под верхнюю юбку рабочего колеса; 4 – верхняя опорная поверхность; 5 – нижняя опорная поверхность; 6 – наружная поверхность ступицы; 7 – уплотнительный пояс; 8 – наружная поверхность верхней юбки

Fig. 2. Controlled dimensions of:

a) guide vanes; b) impellers: 1 – inner surface of the apparatus hub; 2 – inner surface of the entrance to the channels; 3 – surface of the groove under the upper skirt of the impeller; 4 – upper support surface; 5 – bottom support surface; 6 – outer surface of the hub; 7 – sealing band; 8 – outer surface of the upper skirt

$$I = \Sigma c / \Sigma b, \quad (1) \quad \Delta d_{1c} = \frac{d_{1c1} + d_{1c2} + \dots + d_{1cn}}{n_{1c}}, \quad (4)$$

где Σc – суммарный износ контролируемых размеров стандартных ступеней, не подвергнутых упрочнению; Σb – суммарный износ контролируемых размеров ступеней, обработанных с применением технологии жидкостного борирования.

При этом Σc рассчитывается как:

$$\Sigma c = \Delta d_{1c} + \Delta d_{2c} + \Delta d_{3c} + \Delta d_{4c} + \Delta d_{5c} + \Delta d_{6c} + \Delta d_{7c} + \Delta d_{8c}, \quad (2)$$

где $\Delta d_{1c}, \dots, \Delta d_{8c}$ – величины линейного износа ступеней, обработанных по серийной технологии.

Суммарный износ контролируемых размеров ступеней, обработанных с применением технологии жидкостного борирования, рассчитывается как:

$$\Sigma b = \Delta d_{16} + \Delta d_{26} + \Delta d_{36} + \Delta d_{46} + \Delta d_{56} + \Delta d_{66} + \Delta d_{76} + \Delta d_{86}, \quad (3)$$

где $\Delta d_{16}, \dots, \Delta d_{86}$ – величины линейного износа ступеней, обработанных по технологии жидкостного борирования.

Средняя величина износа неборированных НА рассчитывалась по формуле:

где $d_{1c1}, d_{1c2}, \dots, d_{1cn}$ – величины износа неборированного НА по контролируемым размерам 1, 2, ..., n (рис. 2); n_{1c} – количество измеренных неборированных деталей рассчитываемого контролируемого размера (в данном случае размера 1).

В свою очередь, средняя величина износа борированных деталей рассчитывалась по формуле:

$$\Delta d_{16} = \frac{d_{161} + d_{162} + \dots + d_{16n}}{n_{16}}, \quad (5)$$

где $d_{161}, d_{162}, \dots, d_{16n}$ – величины износа первой и второй борированных деталей по размеру 1 соответственно (рис. 2а); n_{16} – количество замеренных борированных деталей по рассчитываемому размеру (в данном случае по размеру 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении геометрических замеров РК и НА было выявлено, что размеры 4 и 5 отражают не фактический износ, а разность между значениями износа двух различных участков, которая может иметь любой знак. Так, изменение размера 4 составляло от –1,0

Таблица 1. Средний износ контролируемых поверхностей борированных и неборированных направляющих аппаратов
Table 1. Average wear of the controlled surfaces of borated and non-borated guide vanes

Поверхность Surfaces	Участок детали Element segment	Размер новой детали, мм New element size, mm	Ремонтный размер, не более, мм Repair size, no more, mm	Допустимый износ направляющего аппарата, мкм Permissible wear of the guide apparatus, μm	Средний износ неборированных направляющих аппаратов, мкм Average wear of non-borated guide apparatus, μm	Средний износ борированных направляющих аппаратов, мкм Average wear of borated guide apparatus, μm	Отношение величин износа Wear ratio
1	Внутренняя поверхность ступицы аппарата The inner surface of the hub of the apparatus	28,7782	29,1 (1-й размер) 29.1 (1st size)	320	133,33	117,88	1,13
			29,3 (2-й размер) 29.3 (2nd size)	520			
2	Внутренняя поверхность входа в каналы The inner surface of the entrance to the channels	57,4294	57,8	370	403,33	127,91	3,15
3	Поверхность проточки под верхнюю юбку рабочего колеса Surface of the groove under the upper skirt of the impeller	60,2996	60,7	400	254,67	69,23	3,67

Таблица 2. Средний износ контролируемых поверхностей борированных и неборированных рабочих колес
Table 2. Average wear of the inspected surfaces of borated and non-borated impellers

Поверхность Surfaces	Участок детали Element segment	Размер новой детали, мм New element size, mm	Ремонтный размер, не более, мм Repair size, no more, mm	Допустимый износ рабочего колеса, мм Permissible wear of the impeller, mm	Средний износ неборированных рабочих колес, мкм Average wear of non-borated impellers, μm	Средний износ борированных рабочих колес, мкм Average wear of borated impellers, μm	Отношение величин износа Wear ratio
6	Наружная поверхность ступицы Outer surface of the hub	28,52	28,2 (1-й размер) 28.2 (1st size)	324	187	141,4	1,32
			28,0 (2-й размер) 28.0 (2nd size)	525			
7	Уплотнительный пояс Sealing belt	57,1	56,7	400	590	221,4	2,66
8	Наружная поверхность верхней юбки Outer surface of the upper skirt	59,94	59,55	390	170	51,3	3,32

до 0,61 мм (в среднем –0,047 мм), а изменение размера 5 – от –0,13 до 0,15 мм (в среднем 0,01 мм), то есть разность значений износа носила случайный характер при том, что в среднем износ обоих участков происходил с практически одинаковой скоростью, поскольку средние значения изменений размеров 4 и 5 были близки к нулю. К примеру, износ размера 4 может проходить по внешнему бортику детали на 1 мм и одно-

временно по внутренней поверхности (уступ) также на 1 мм, тогда суммарный износ размера 4 составит 0, что не является адекватной оценкой износа. Аналогичная ситуация с размером 5. По этой причине изменение размеров 4 и 5 в дальнейшем не рассматривалось как не соответствующее поставленной задаче. Средние величины замеренного износа для борированных и небориро-

ванных деталей по всем остальным размерам представлены в табл. 1 и 2. Из представленных в таблицах данных видно, что износ контролируемых поверхностей как неборированных, так и борированных НА и РК проходил неравномерно. В НА наибольший износ зафиксирован на внутренней поверхности входа в каналы, в РК – по уплотнительному пояску. Применительно к неборированным НА износ внутрен-

ней поверхности входа в каналы (поверхность 2) превысил допуск на ремонтный размер. В неборированных РК превышение допуска на ремонтный размер произошло по поверхности уплотнительного пояса (поверхность 7). Вследствие превышения указанных допусков все неборированные НА и РК подлежат списанию. Вместе с тем износ тех же поверхностей борированных НА и РК оказался меньше в 3,15 и 2,66 раза. Эти значения и являются коэффициентами технической эффективности применения технологии жидкостного борирования для данных конкретных поверхностей деталей. Если рассмотреть средние значения коэффициентов технической эффективности для всех контролируемых поверхностей, то они составляют для НА и РК 2,51 и 2,28 соответственно.

Следует особо отметить, что ни на одной из контролируемых поверхностей НА и РК, подвергнутых борированию, не зафиксирован износ, превышающий допуск на ремонтный размер. То есть если все неборированные НА и РК подлежат списанию, то износ тех же деталей, подвергнутых жидкостному борированию, укладывается в допуски на ремонтные размеры, следовательно,

эти детали могут быть использованы повторно.

Вместе с тем исследование показало, что контролируемые поверхности борированных деталей были изношены в разной степени. Очевидно, что при повторном использовании деталей защитного эффекта борирования на данных поверхностях не будет. Однако поскольку на большинстве эксплуатируемых нефтяных месторождений индекс агрессивности и концентрация в добываемой жидкости абразивных частиц намного меньше, продолжительность защитного эффекта борированного слоя будет выше.

Позволит ли технология жидкостного борирования использовать РС 3–5 раз с минимальным процентом отбраковки на скважинах определенной категории, еще предстоит выяснить.

Областью применения технологии жидкостного борирования с наибольшей экономической эффективностью, скорее всего, станет область с условиями, аналогичными описанным в данной статье: ЭЦН с расходом более 250 м³/сут, откачивающий жидкость с повышенным содержанием частиц, вызывающих ускоренный абразивный и гидроабразивный износ.

ВЫВОДЫ

1. Промысловый эксперимент подтвердил потенциальную техническую эффективность применения технологии жидкостного борирования для снижения уровня износа деталей ЭЦН, а также потенциальную возможность увеличения наработки оборудования при наличии в жидкости абразивных частиц.

2. В результате жидкостного борирования увеличилась износоустойчивость направляющих аппаратов и рабочих колес ЭЦН. Средние значения коэффициентов технической эффективности применения технологии жидкостного борирования составили для НА и РК 2,51 и 2,28 соответственно.

3. Для принятия окончательного решения по тиражированию технологии в масштабах ПАО «НК «Роснефть» необходимо провести испытания опытной партии ЭЦН с борированными РС в целях подтверждения на практике возможности увеличения наработки на отказ, возможности эксплуатации скважин с большей депрессией на пласт и определения области технико-экономической целесообразности применения данной технологии.

Литература:

1. Герасимова Н.С. Химико-термическая обработка сталей и сплавов: учебное пособие по курсу «Материаловедение». Калуга: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 48 с.
2. Ли Дж.Ф., Мохтаб С. Обзор технологии электрических центробежных насосов // РОГТЕХ [Электронный источник]. Режим доступа: <https://www.petroleumengineers.ru/sites/default/files/11.pdf> (дата обращения: 28.08.2020).
3. Цих С.Г., Мартынов В.Н., Шкляр Н.Е. Жидкостное борирование // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2015. № 6 (104). С. 38–40.
4. Акопов Е.Ю. Обоснование и выбор методов повышения ресурса погружных центробежных насосов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ФГАОВ ВО НИТУ «МИСиС», 2017. 20 с.
5. Якимов С.Б. Индекс агрессивности выносимых частиц на месторождениях ТНК-ВР в Западной Сибири // Нефтепромысловое дело. 2008. № 9. С. 33–38.
6. Fastovets A., Samoylin V., Sharafiev R. et al. A Holistic Approach to Improving ESP Reliability and Energy Efficiency at Van-Yogan field // SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition. 2016. SPE-181959-MS.

References:

1. Gerasimova N.S. Chemical-Heat Treatment of Steels and Alloys: textbook for the course "Materials Science". Kaluga: MSTU named by N.E. Bauman; 2017. (In Russ.)
2. Lea J.F., Mokhtab S. An Overview of Electric Submersible Pumps Technology. ROGTEC. Weblog. Available from: <https://www.petroleumengineers.ru/sites/default/files/11.pdf> [Accessed 28th August 2020].
3. Tsikh S.G., Martynov V.N., Shklyar N.E. Liquid Boriding. RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya [RHYTHM: Repair. Innovation. Technology. Modernization]. 2015;6(104):38–40. (In Russ.)
4. Akopov E.Yu. Justification and Selection of Methods for Increasing the Resource of Submersible Centrifugal Pumps: Ph.D. thesis in Engineering Science. Moscow: FSAEI HE NUST MISIS; 2017. (In Russ.)
5. Yakimov S.B. The Index of Aggressiveness of Carried Particles at the TNK-BP Fields in Western Siberia. Neftepromyslovoye delo [Oilfield Business]. 2008;(9):33–38. (In Russ.)
6. Fastovets A., Samoylin V., Sharafiev R. et al. A Holistic Approach to Improving ESP Reliability and Energy Efficiency at Van-Yogan field. SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition. 2016. SPE-181959-MS.