

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЁТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕФТЯНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛАДКИХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация. Исследование посвящено изучению влияния гладких покрытий, наносимых на поверхности проточных частей нефтяных магистральных насосов, на показатели энергоэффективности указанных насосов. В качестве покрытий использованы составы Loctite 7227 и Belzona 1341, которые позволяют существенно снизить шероховатость покрываемых поверхностей. Отличительными качествами указанных покрытий являются низкая стоимость и простота нанесения (с помощью кисти или путем распыления), что, несмотря на отсутствие свойств гидрофобности, определяет целесообразность их применения в условиях эксплуатации на нефтеперекачивающих станциях. Проведены экспериментальные исследования, включающие испытания покрытий на натурных насосах НМ 1250-260 и НМ 10000-210. Результаты экспериментальных исследований сопоставлены с результатами аналитических расчётов. По результатам исследований подтверждена целесообразность использования гладких негидрофобных покрытий при условии нанесения на поверхности проточных частей спиральных отводов нефтяных магистральных насосов. Кроме этого, подтверждена достоверность предлагаемой аналитической методики оценки эффективности покрытий.

Ключевые слова: насос, покрытие, КПД, эксперимент.

Akimov Stanislav¹
akimovsv@pumps.transneft.ru

¹JSC «Transneft Oil Pumps», Russia Chelyabinsk

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL STUDIES OF CHANGES IN THE EFFICIENCY OF MAINLINE OIL PUMPS DUE TO THE USE OF SMOOTH COATINGS

Abstract. The study is focused on the research of influence of smooth coatings applied on the flow part surfaces of mainline oil pumps on energy efficiency

indicators of the mentioned pumps. The coatings used are Loctite 7227 and Belzona 1341 which allow a significant reduction in roughness of the coated surfaces. The peculiarities of the said coatings are low cost and easy application (by using a brush or by spraying) which, despite of absence of hydrophobic properties, makes them applicable under operating conditions at oil pumping stations. Experimental studies have been carried out including the coatings testing on full scale pumps MOL 1250-60 and MOL 10000-210. The results of experimental studies have been compared with the results of calculations. The results of the study have confirmed applicability of smooth non-hydrophobic coatings when applied on the flow part surfaces of mainline oil pumps' volutes. In addition the reliability of the proposed analytical method for evaluating the effectiveness of coatings was confirmed.

Keywords: pump, coating, efficiency, experimental, study.

Введение

В организациях системы «Транснефть» в настоящее время эксплуатируются 2121 магистральных и подпорных насосных агрегатов. При этом среднее суммарное годовое потребление электроэнергии магистральными и подпорными агрегатами составляет порядка 14 млрд кВт·ч на сумму почти 42 млрд руб., что составляет 89 % потребления энергии ПАО «Транснефть» [1].

Из приведённых данных следует, что в случае повышения КПД указанных насосов всего лишь на 1 % годовая экономия электроэнергии составит 140 млн кВт·ч на сумму 420 млн руб.

При этом, одним из перспективных методов повышения энергоэффективности центробежных насосов (далее – ЦН) в настоящее время является улучшение качества поверхностей проточных частей (ПЧ) ЦН за счёт нанесения специализированных покрытий, эффективность которых может увеличиваться за счёт придания поверхностям дополнительных свойств, например – гидрофобности, стойкости к коррозионному и эрозионному воздействию перекачиваемых сред и т. д.

Существует достаточно большое количество разновидностей покрытий ПЧ насосов. Исчерпывающий обзор большинства из них приведён в диссертационной работе С. А. Чернышева [2]:

– покрытия на основе катафореза (метод нанесения эпоксидных составов, при котором покрываемый объект подключён в ка-

честве катода в постоянном электрическом поле анолита – раствора наносимого материала, и притягивает катионы наносимого состава);

- покрытия на основе керамики;
- футеровка поверхностей различными эластомерными материалами (каучуки и резины на их основе);
- газотермические покрытия на основе высокопрочных соединений, например карбида вольфрама;
- покрытия на основе металлополимеров (двухкомпонентные полимерные материалы, на основе эпоксидных смол, наполненных мелкодисперсными металлическими и минеральными порошками);
- покрытия на основе ионно-плазменного напыления из нитридов и карбидов переходных металлов IV–VI групп периодической системы Менделеева.

В дополнение к вышеприведённому списку в работе [2] предлагается использовать покрытия на основе поверхностно-активных ингибиторов коррозии и фторопласта.

Большинство указанных покрытий имеют сложную технологию нанесения, предполагающую в том числе необходимость использования массивных стационарных установок (ванн электроосаждения, газоплазменных установок, специальных камер для обеспечения циркуляции реагентов и т. д). Учитывая сравнительно большие габариты РК и корпусных деталей нефтяных магистральных насосов, а также, что существующие насосы рассредоточены по большей части территории РФ, обеспечить нанесение и ремонт таких покрытий на месте эксплуатации весьма затруднительно.

Указанные недостатки отсутствуют у покрытий на основе металлополимеров, к которым относятся, например, Loctite 7227 Nordbak Brushable Ceramic производства компании Henkel (Германия) и Belzona 1341 Supermetalgilde производства компании Belzona Polymerics Limited (Великобритания). Данные покрытия присутствуют в свободной продаже, имеют низкую стоимость и сравнительно простую технологию нанесения на поверхности

ПЧ – с помощью кисти или распылителя (аналогично обычным лакокрасочным защитным покрытиям).

Лабораторные исследования, проведённые ООО «НИИ Транснефть» совместно с ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» показали, что покрытия Loctite 7227 и Belzona 1341 не являются гидрофобными [3]. Краевой угол смачивания для обоих покрытий составил $< 90^\circ$ и был близок к соответствующему углу для образца из стали 20ГЛ. Таким образом, повышение КПД насосов при нанесении указанных покрытий обеспечивается исключительно за счёт уменьшения шероховатости поверхностей.

Решение о внедрении указанных покрытий, требует технико-экономического обоснования, что в свою очередь определяет необходимость в расчётном и экспериментальном исследовании влияния покрытий на энергоэффективность нефтяных магистральных насосов.

Материалы и методы

Методами исследования определены экспериментальный и аналитический метод.

В качестве насосов, подвергаемых исследованиям, выбраны магистральные насосы производства АО «ТНН»:

– НМ 1250-260, НМ 10000-210 для проведения исследований экспериментальным методом;

– НМ 1250-260, НМ 2500-230, НМ 3600-230, НМ 7000-210, НМ 10000-210 для проведения исследований аналитическим методом.

Параметры и характеристики магистральных насосов соответствуют специальным техническим требованиям СТТ 23.080.00 КТН-240-14 [4].

Следует отметить, что испытаниям подвергались две модификации насоса НМ 1250-260. Модификация с условным обозначением НМ 1250-260-1 выпускалась до 2017 г. и отличается применением однозавиткового спирального отвода с предустановленным однолопаточным направляющим аппаратом, лопатка которого играет роль разделительной перегородки двухзавиткового спи-

рального отвода, в то время как модификация НМ 1250-260-2, которая выпускается в настоящее время, имеет в конструкции классический двухзавитковый спиральный отвод.

В качестве материалов применялись покрытия Loctite 7227 Nordbak Brushable Ceramic и Belzona 1341 Supermetalgilde. В некоторых случаях нанесение покрытий имитировалось выполнением полировки соответствующих поверхностей ПЧ.

Величина шероховатости поверхностей с покрытием и поверхностей, прошедших полировку, оценивается как $< Ra0,8$.

Величина шероховатости исходных поверхностей ПЧ насосов, прошедших дробеструйную обработку, определена с помощью образцов шероховатости по ОСТ 2.БВ69-1-79 с рядом значений – $Ra12,5$; $Ra25$; $Ra50$; $Ra100$; $Ra200$, и оценивается величиной $Ra40$ (стандартное значение, промежуточное между $Ra25$ и $Ra50$).

Экспериментальный метод

Суть метода заключается в проведении стендовых испытаний двух вариантов насоса – без покрытия (в исходном состоянии) и с покрытием, с проведением последующего сравнения результатов испытаний.

Место проведения испытаний – стенд для параметрических испытаний АО «ТНН» № КНР 15-00.00.000 (г. Челябинск).

Стенд обеспечивает проведение испытаний с первым классом точности по ГОСТ 6134-2007 (ИСО 9906:2007) и обладает следующими метрологическими характеристиками:

– относительная предельная погрешность измерения расхода $e_Q = 0,2 \%$;

– относительная предельная погрешность измерения напора $e_H = 0,72 \%$;

– относительная предельная погрешность измерения КПД $e_{\eta} = 0,75 \%$.

Методика проведения испытаний, требования к испытательному стенду и условиям проведения испытаний соответствуют требованиям ГОСТ 6137-2007.

Конструкция испытательного стенда выполнена по открытой схеме. Испытательная среда – техническая вода хранится в подземном бассейне вместимостью 2615 м³. К испытуемым насосам вода подаётся с помощью двух циркуляционных вертикальных полупогружных насосов, включённых по параллельной схеме. Регулирование подачи испытуемых насосов производится с помощью регулирующего клапана, установленного на напорном трубопроводе.

Все испытания проведены на номинальной частоте вращения ротора 3000 об/мин. Потребляемая мощность насоса определялась как произведение крутящего момента на угловую скорость ротора. Измерение крутящего момента было обеспечено датчиком крутящего момента, устанавливаемого между насосом и электродвигателем.

Измерение расхода выполнялось с помощью нескольких электромагнитных расходомеров с различными диапазонами измерений.

Особенностью стенда является возможность получения параметров режима насоса (напор, подача, крутящий момент, КПД, частота вращения ротора) путём их осреднения в течение заданного промежутка времени (интервала анализа, для исследований принят равным 60 с). Данная особенность позволяет значительно снизить случайные погрешности измерений, вызванные колебаниями параметров в процессе работы насосов на стенде.

Абсолютные значения параметров насоса – подачи Q , напора H , мощности P и коэффициента полезного действия η приводятся по формулам (1), (2), (3), (4) к относительным значениям φ , ψ , λ , η_{rel} соответственно:

$$\varphi = \frac{Q}{f_q \cdot 2\pi \cdot R_2 \cdot b_2 \cdot U_2}, \quad (1)$$

$$\psi = \frac{2gH}{U_2^2}, \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{P}{f_q \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_2 \cdot b_2 \cdot U_2^3}, \quad (3)$$

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_{ber}}. \quad (4)$$

Аналитический метод

Метод расчёта гидравлических потерь трения в спиральном отводе ранее был изложен в работе [4]. Суть данного метода заключается в интегрировании по поверхности отвода уравнения (5), связывающего мощность потерь с характеристиками потока среды. Уравнение (5) в свою очередь позаимствовано из книги J. F. Gülich «Centrifugal Pumps» [5].

$$dP = \frac{\rho}{2} \cdot (c_f + 0,0015) \cdot V^3 \cdot dA. \quad (5)$$

где dP – мощность потерь на трение жидкости о поверхность площадью dA , ρ – плотность жидкости, V – абсолютная скорость течения жидкости, c_f – коэффициент трения.

Вывод формул для потерь в спиральном отводе путём интегрирования выражения (5) возможен при условии упрощения геометрии отвода, в связи с чем форма поперечного сечения отвода упрощается до прямоугольной с постоянной шириной B , а реальный профиль спирали заменяется эквивалентной спиралью Архимеда, радиус R_S и угол φ которой связаны формулой:

$$R_S = \frac{H_p}{2\pi} \cdot \varphi, \quad (6)$$

где H_p – высота рабочего сечения отвода.

Абсолютная скорость движения жидкости в произвольной точке спирального отвода, находящейся на расстоянии R от центральной оси (оси вращения ротора насоса), определяется по формулам:

$$V = \left(V_m^2 + V_u^2 \right)^{0,5}, \quad (7)$$

$$V_m = \frac{Q}{2\pi RB\eta_v}, \quad (8)$$

$$V_u = V_{u2} \frac{R_2}{R} = \frac{gH}{\omega R_2 \eta_h} \frac{R_2}{R} = \frac{gH}{\omega R \eta_h}, \quad (9)$$

из чего окончательно получаем:

$$V = \frac{1}{R} \left(\frac{Q^2}{4\pi^2 B^2 \eta_v^2} + \frac{g^2 H^2}{\omega^2 \eta_h^2} \right)^{0,5}, \quad (10)$$

где η_v, η_h – объёмный и гидравлический КПД соответственно.

Коэффициент трения c_f в соответствии с [5] определяется по формуле:

$$c_f = \frac{0,136}{\left[-\log \left(0,2 \frac{k_s}{R_h} + \frac{12,5}{Re} \right) \right]^{2,15}}, \quad (11)$$

где k_s – абсолютная (песочная) шероховатость, $R_h = 0,5 \cdot D_h$ – гидравлический радиус, Re – число Рейнольдса, ν – кинематическая вязкость перекачиваемой жидкости.

$$D_h = \frac{4A}{P_w}, \quad (12)$$

$$Re = \frac{V_{cp} D_h}{\nu}, \quad (13)$$

где A – поперечная площадь сечения спирального канала, P_w – периметр поперечного сечения канала (смоченный периметр), V_{cp} – средняя скорость течения в сечении.

Среднее значение скорости V_{cp} принимается как среднее арифметическое значений $V(R_2)$ и $V(R_{max})$, вычисленных по формуле (10), где R_{max} – наибольший радиус сечения (радиус спиральной стенки в сечении).

Непосредственное интегрирование формулы (5) затруднено в связи с тем, что коэффициент c_f в соответствии с формулами (11), (12), (13) различен для разных сечений отвода. Поэтому це-

лесообразно разбить область спирального отвода на несколько сегментов, в пределах которых значение c_f можно принять постоянным. Как правило, для достижения хорошей точности хватает $8 \div 10$ сечений.

С учётом изложенного результат интегрирования уравнения (5) по двум боковым и одной спиральной стенке отвода может быть представлен формулами:

$$P = K_1 \cdot \sum_{i=1}^n \left[(c_f + 0,0015) \left(\iint_{A_i} \frac{1}{R^3} dA \right) \right], \quad (14)$$

$$K_1 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q^2}{4\pi^2 B^2 \eta_v^2} + \frac{g^2 H^2}{\omega^2 \eta_h^2} \right)^{1,5}, \quad (15)$$

где n – количество секторов.

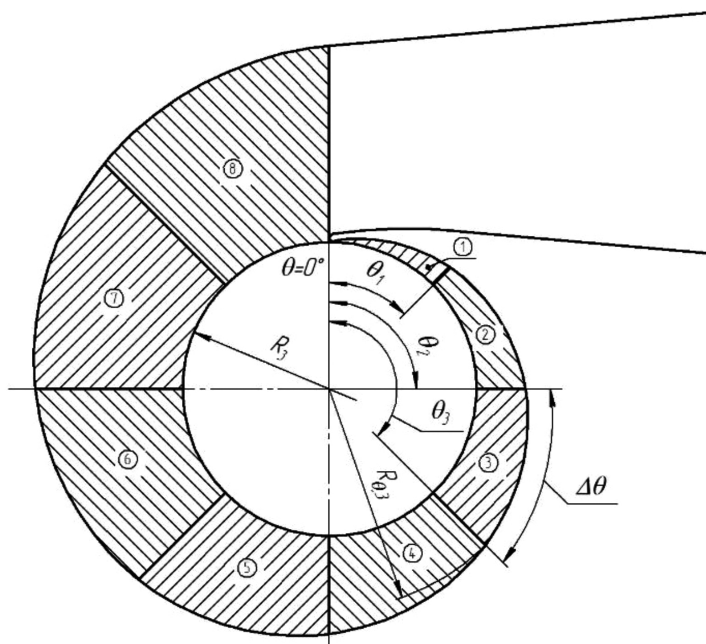


Рис. 1. Пример разбиения отвода на 8 сегментов

Интеграл в формуле (14) может быть представлен в виде:

$$\iint_{A_i} \frac{1}{R^3} dA = 2I_{C,i} + 2I_{S,i} + I_{SP,i}, \quad (16)$$

где I_C , I_S , I_{SP} – интегралы для двух боковых и одной спиральной стенки отвода.

$$I_{C,i} = \frac{2\pi}{n} \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_3 + H_p \frac{i-1}{n}} \right), \quad (17)$$

$$I_{S,i} = \left[\left(2\pi \frac{i}{n} + \frac{2\pi R_3}{H_p} \right) \left(-\frac{1}{R} \right) - \frac{2\pi}{H_p} \ln R \right] \Bigg|_{H_p \frac{i-1}{n}}^{H_p \frac{i}{n}}, \quad (18)$$

$$I_{SP,i} = -\frac{2\pi^2 B}{H_p^2} \left[\frac{1}{\varphi^2} \sqrt{1+\varphi^2} + \ln \left(\frac{1}{\varphi} \right) + \ln \left(1 + \sqrt{1+\varphi^2} \right) \right] \Bigg|_{-2\pi \frac{i-1}{n} + \frac{2\pi R_3}{H_p}}^{2\pi \frac{i}{n} + \frac{2\pi R_3}{H_p}}, \quad (19)$$

где R_3 – радиус расположения языка отвода (рисунок 1).

Для случая двухзавиткового спирального отвода, последний можно рассматривать как систему, состоящую из двух спиральных каналов «а», «б» и одного переводного канала «ПК».

При расчёте гидравлических потерь в отводе такого типа, для определения потерь в спиральных каналах применяются ранее приведённые формулы для однозавиткового спирального отвода с той лишь разницей, что суммирование в формуле (14) выполняется для $i/2$ секторов.

Вычисление потерь в переводном канале также выполняется по формуле (5), при этом скорость принимается постоянной и равной:

$$V_{\text{пк}} = \frac{0,5Q}{(0,5H_p - s)B}, \quad (20)$$

где s – толщина разделительной перегородки.

Для вычисления потерь в коническом диффузоре, определяются размеры эквивалентного диффузора круглого сечения, входной диаметр которого равен гидравлическому диаметру рабочего сечения спирального отвода, а длина эквивалента длине конического диффузора.

Эквивалентный диффузор, как и спиральный отвод, разбивается на N сегментов (рисунок 3), в пределах которых число Рейнольдса и гидравлический диаметр изменяются незначительно. Тогда скорость и число Рейнольдса на i -м участке можно определить по формулам:

$$V_{Д,i} = \frac{4Q}{\pi D_{Д,i}^2}, \quad (21)$$

$$Re_{Д,i} = \frac{V_{Д,i} \cdot D_{Д,i}}{\nu}. \quad (22)$$

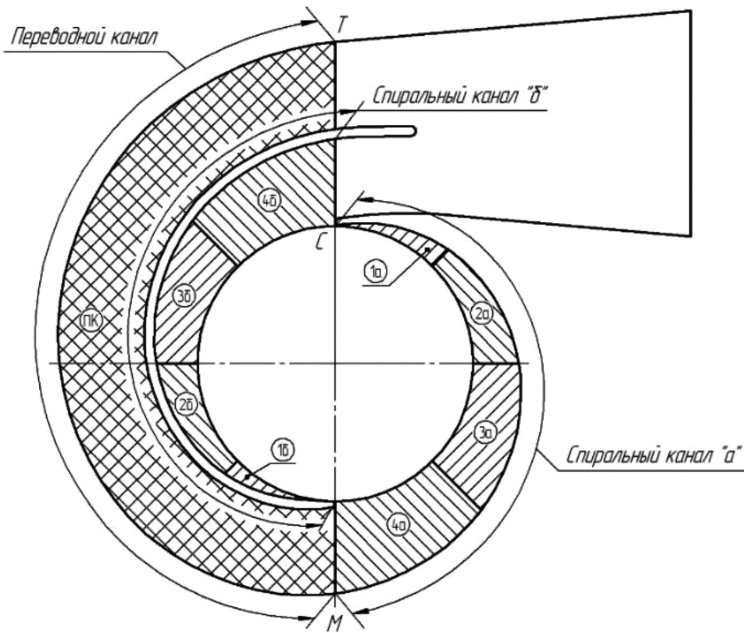


Рис. 2. Двухзавитковый спиральный отвод

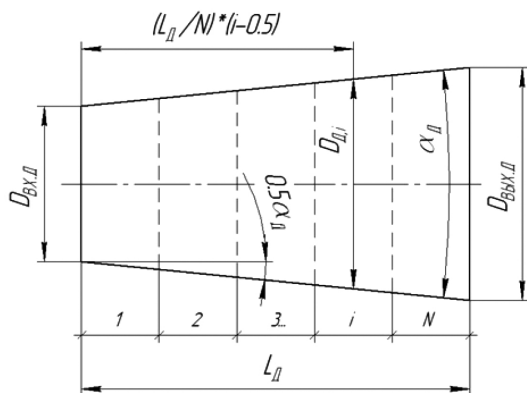


Рис. 3. Схема эквивалентного диффузора

Далее коэффициент трения рассчитывается по формуле (11), а суммарные потери в коническом диффузоре – по формуле (22).

$$P_D = \frac{32\rho Q^3}{\pi^2} \cdot \frac{L_D}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{\overbrace{0,136}^{+0,0015} \left[-\log \left(0,2 \frac{k_S}{R_{Д,i}} + \frac{12,5}{Re_{Д,i}} \right) \right]^{2,15}}{D_{Д,i}^5}. \quad (23)$$

Одним из главных вопросов, возникающих при проведении аналитических и CFD-расчётов для определения степени влияния качества поверхностей проточной части на эффективность насоса, является вопрос корректного задания величины шероховатости. Данный вопрос вызван главным образом тем, что для вычислений применяется такая характеристика поверхности как эквивалентная песочная шероховатость k_S , в то время как результаты измерения шероховатости реальных поверхностей выражаются как правило в технических величинах R_a и R_z .

Перевод показателя R_a в k_S можно выполнить по формуле (23) из источника [5]:

$$k_S = \frac{6 \cdot R_a}{c_{eq}}, \quad (24)$$

где коэффициент c_{eq} зависит от метода обработки и в среднем рекомендуется принимать равным 2,6.

При этом в зависимости от конфигурации микронеровностей поверхности фактическое значение коэффициента c_{eq} лежит в широких пределах – от 0,2 до 8,4 в соответствии с [5].

Поэтому подтверждение достоверности результатов при применении $c_{eq} = 2,6$ также является важной задачей, решаемой в настоящей работе.

Результаты

Результаты исследований с применением экспериментального метода

Напорные и энергетические характеристики насоса НМ 1250-260-1 в безразмерном виде, до и после нанесения покрытия приведены на рисунке 4. При этом вертикальной пунктирной линией показан режим наибольшего КПД, а знаком «*» отмечены параметры насоса с нанесённым покрытием.

Покрытие было нанесено на поверхности спирального канала и конического диффузора.

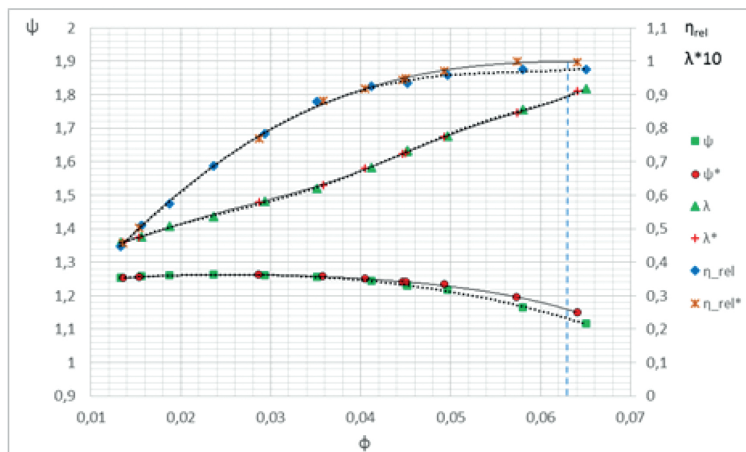


Рис. 4. Характеристики насоса НМ 1250-260-1

Отсутствие на характеристиках рисунок 4 точек в зоне высоких подач (правее пунктирной линии) объясняется тем, что изначально, до нанесения покрытия, рабочая точка насоса в соответствии с требованиями заказчика располагалась левее подачи $Q_{бер}$ (подачи при максимальном КПД) с соответствующим сдвигом рабочего диапазона влево. При этом решение о нанесении покрытия на указанный насос было принято после проведения его испытаний в исходном состоянии.

Для модификации НМ 1250-260-2 нанесение покрытия было сымитировано путём выполнения полировки спиральных каналов отвода. При этом состояние поверхности переводного канала и конического диффузора были сохранены в исходном состоянии.

Напорные и энергетические характеристики насоса НМ 1250-260-2 в безразмерном виде, до и после нанесения покрытия приведены на рисунке 5.

Увеличение напора и КПД насосов НМ 1250-260 на номинальной подаче ($\sim 1250 \text{ м}^3/\text{ч}$) составило:

- для насоса НМ 1250-260-1 – $\Delta H = 6,7 \text{ м}$; $\Delta \eta = 2 \%$;
- для насоса НМ 1250-260-2 – $\Delta H = 4,9 \text{ м}$; $\Delta \eta = 2,4 \%$.

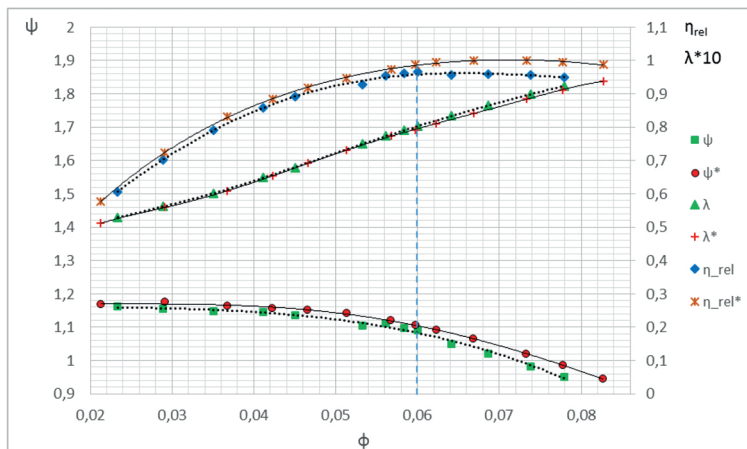


Рис. 5. Характеристики насоса НМ 1250-260-2

Исследования покрытий поверхностей рабочих колёс насосов НМ 1250-260 не проводились, вследствие затруднённого доступа к межлопастным каналам относительно небольшой ширины, а также вследствие нецелесообразности нанесения покрытий на диски колёс, обусловленной высоким качеством их поверхностей в исходном состоянии ($Ra < 1,6$).

Аналогичные экспериментальные исследования проведены для насоса НМ 10000-210. Как и в случае насоса НМ 1250-260-2 выполнена полировка спиральных каналов отвода. Испытания с нанесением покрытий на лопасти рабочих колёс (РК) показали ненадёжность такого покрытия. При проведении ревизии РК двух насосов НМ 10000-210 были выявлены значительные сколы покрытия на поверхностях лопаток, что по всей видимости объясняется затруднённым доступом к межлопастным каналам и, как следствие, невозможностью обеспечения качественного нанесения. В данном случае, по-видимому, целесообразно выполнять механическую полировку лопаток и выбирать коррозионностойкие материалы для изготовления РК.

Результаты испытаний насоса НМ 10000-210 с полированными поверхностями спиральных каналов отвода практически совпали с результатами исходного варианта. Наблюдалось незначительное повышение КПД на 0,1...0,2 % в зоне его максимальных значений, что не может считаться достоверным результатом, так как предельная погрешность измерения КПД $e_{\eta} = 0,75$ % на стенде существенно превышает указанные значения.

Отличие полученного для НМ 10000-210 результата от результатов для насосов НМ 1250-260 можно объяснить тем, что у насоса НМ 10000-210 размеры поперечных сечений каналов (гидравлические диаметры каналов) значительно больше, чем у насосов НМ 1250-260. В то же время абсолютная величина шероховатости литых поверхностей ПЧ для обоих насосов составляет $Ra40$, так как данная величина определяется в основном технологией литья.

Как следствие, величина относительной шероховатости (отношения величины абсолютной шероховатости к гидравлическому диаметру) исходных поверхностей ПЧ у насоса НМ 10000-210

существенно меньше чем у насоса НМ 1250-260, а снижение относительной шероховатости при нанесении покрытия не так значительно.

Достоверность определения величины повышения КПД насоса НМ 10000-210 средствами CFD-анализа также вызывает сомнения, так как CFD-метод может иметь свою погрешность, превышающую 0,2 %.

Учитывая изложенное, влияние покрытий спирального отвода на КПД насосов целесообразно исследовать аналитическим методом, который лишён недостатков экспериментального и CFD метода в части погрешностей.

Результаты исследований с применением аналитического метода

С помощью сравнительных расчётов аналитическим методом для шероховатостей $k_s = 92$ мкм (Ra40) и $k_s = 0$ мкм получены величины прироста КПД для типоразмерного ряда насосов НМ (рисунок 6).

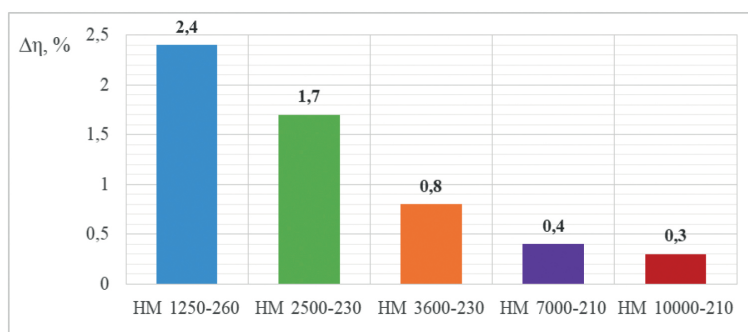


Рис. 6. Прирост КПД насосов типа НМ

Примечательно, что для насоса НМ 1250-260-2 совпадение расчётного и экспериментального значения составило 100 %. Столь точный результат является скорее всего случайностью, так как аналогичные расчёты, выполненные для НМ 1250-260-1, у кото-

рого покрытие было нанесено не только на спиральные каналы, но и на переводной канал с коническим диффузором, показали прирост КПД на 2,2 % в отличие от экспериментального значения 2,0 %, что, однако, также является хорошим результатом.

Прирост КПД для насоса НМ 10000-210, как и ожидалось, составил относительно небольшую величину 0,3 %, которую крайне трудно достоверно зафиксировать экспериментальным способом.

Дополнительно следует проанализировать величины снижения потребляемой мощности насосов типа НМ, соответствующие вышеуказанным приростам эффективности.

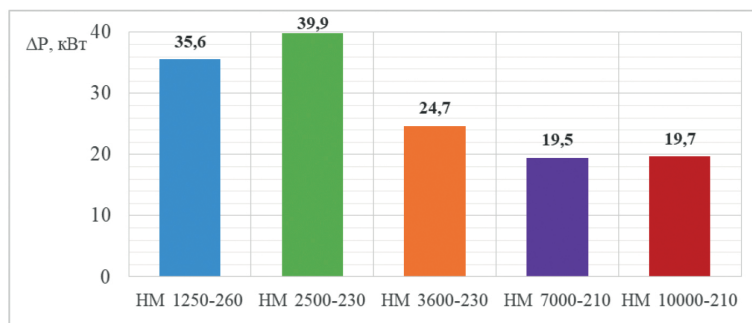


Рис. 7. Снижение потребляемой мощности насосов НМ

Как видно из рисунка 7 снижение потребляемой мощности всех насосов имеет существенную величину.

Результаты оценки экономического эффекта от нанесения гладких покрытий

Учитывая, полученные значения снижения потребляемой мощности, можно оценить годовую денежную экономию. Для этого примем стоимость одного киловатт-часа электроэнергии 4 рубля, а среднегодовой коэффициент загрузки насоса (отношение наработки насоса в течение года к количеству часов в году) k_3 равным 0,5.

Среднегодовая экономия денежных средств определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_r = 8760 \cdot k_3 \cdot k_p \cdot \Delta P \cdot \mathcal{C}_{\text{э}}, \quad (25)$$

где $\mathcal{C}_{\text{э}}$ – стоимость одного киловатт-часа электроэнергии, k_p – коэффициент, учитывающий плотность перекачиваемого продукта (отношение плотности продукта к плотности воды, для нефти $k_p = 0,86$, 8760 – количество часов в году.

Учитывая, что стоимость 1 кг покрытия LOCTITE7227 Nordbak Brushable Ceramic по состоянию на 2019 г. составляла порядка 8,3 тыс. руб. и что 1 кг данного покрытия достаточно для нанесения на 100 % площади спиральных каналов отвода насоса НМ 10000-210, очевидно, что годовой экономический эффект будет практически соответствовать значениям, приведённым на рисунке 8.

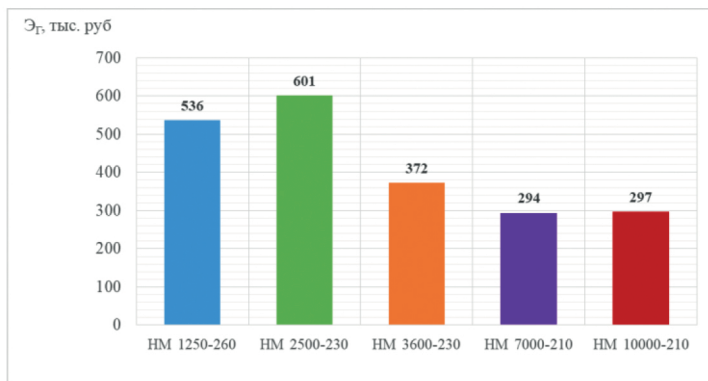


Рис. 8. Среднегодовая экономия денежных средств

В 2018 г. началась опытная эксплуатация насоса НМ 1250-260-1 с покрытием Belzona 1341 на нефтеперекачивающей станции. При последнем вскрытии насоса в октябре 2019 г. наработка насоса составила более 4000 ч (~0,46 от продолжительности одного года) в течение 1,5 лет. Состояние покрытия – хорошее, сколы и износ покрытия на поверхностях спирального канала отсутствуют. Таким образом, можно с большой долей вероятности

утверждать, что указанный выше экономический эффект при $k_3 = 0,5$ будет обеспечен.

Обсуждение

Существенный эффект – снижение потребляемой мощности одного насоса в диапазоне значений от 20 до 40 кВт и экономический эффект от 300 до 600 тыс. руб. в год достигается даже при условии отсутствия у покрытий типа Loctite 7227 Nordbak Brushable Ceramic и Belzona 1341 Supermetalgilde гидрофобных свойств. При этом значения прироста КПД на номинальной подаче лежат в пределах от 2,4 % для НМ 1250–260 до 0,3 % для НМ 10000–210.

Однако, ряд исследователей, например [2], отмечают, что наличие гидрофобных свойств может значительно повысить эффективность покрытий. Из этого следует, что производителям покрытий следует двигаться в направлении разработки новых составов, сочетающих преимущества как гладких негидрофобных, так и гидрофобных покрытий:

- простота нанесения покрытий на поверхности;
- ремонтпригодность покрытий;
- низкая стоимость;
- дополнительное снижение гидравлических потерь за счёт наличия гидрофобных свойств.

С учётом количества эксплуатируемых в системе «Транснефть» насосов (более 2000 шт.) потенциальная сумма годовой экономии может составить 600 миллионов руб. и более.

Несмотря на высокие значения экономического эффекта, имеется дополнительный потенциал его повышения. Данный потенциал может быть реализован, при условии обеспечения нанесения покрытия на поверхности переводного канала двухзавиткового спирального отвода и поверхности конического диффузора. В конструкциях насосов НМ, применяемых в настоящее время, поверхности переводного канала не доступны для окрашивания, а к поверхности конического диффузора отсутствует доступ для проведения ремонтов покрытия в процессе эксплуатации насосов, так как патрубки насосов НМ соединяются с трубопроводами методом сварки.

Доступ к указанным поверхностям может быть обеспечен за счёт совершенствования конструкции насосов, например, за счёт оснащения их съёмными разборными проточными частями, как это реализовано в патенте на полезную модель [6]. Указанное направление работ является перспективным и требует проведения опытно-конструкторских работ.

Совпадение результатов эксперимента с результатами вычисления роста КПД по предлагаемой аналитической методике, свидетельствует о её достоверности. Указанное совпадение также подтверждает обоснованность применения формулы (23) для перевода технического показателя шероховатости R_a в значение эквивалентной песочной шероховатости k_s для литых поверхностей, прошедших дробеструйную обработку. Предлагаемая аналитическая методика может найти применение для экспресс-анализа эффективности покрытий при работе насосов в зоне максимального КПД, а также в случаях, когда величина роста КПД вследствие низкого значения не может быть достоверно определена с помощью других методов (эксперимент, CFD-расчёты).

Экспериментальным методом определен характер изменения характеристик насоса после нанесения покрытия:

- увеличение КПД происходит преимущественно за счёт увеличения напора насоса;
- прирост КПД выше при работе насоса на подачах, превышающих номинальную, и снижается на подачах, меньше номинальной;
- в результате нанесения покрытия значение подачи, соответствующее максимуму КПД, смещается в сторону больших значений (вправо по характеристике).

Дополнительно следует отметить, что перспективным направлением является проведение валидаций CFD-методов и соответствующего программного обеспечения с точки зрения его применения для оценки эффективности покрытий.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования влияния гладких покрытий на эффективность нефтяных магистральных насосов.

Проведена апробация аналитической методики оценки эффективности применения покрытий, по результатам которой сделан вывод о достоверности указанной методики.

По результатам проведённых исследований обоснована целесообразность применения гладких покрытий типа Loctite 7227 Nordbak Brushable Ceramic и Belzona 1341 Supermetalglide для нанесения на проточные части отводов для всех типоразмеров насосов НМ.

Выполнена оценка экономического эффекта, составляющего от 300 до 600 тыс. руб. в год для одного насоса в зависимости от его типоразмера.

Список литературы

1. **Ревель-Муроз П. А.** Разработка методов повышения энергоэффективности нефтепроводного транспорта с внедрением комплекса энергосберегающих технологий : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Уфа, 2018. – 202 с.

2. **Чернышев С. А.** Повышение эксплуатационных качеств центробежных насосов на основе изменения гидродинамического взаимодействия рабочего потока с элементами проточной части : автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – М., 2008. – 18 с.

3. Итоговый научно-технический отчёт по результатам научно-исследовательской работы «Апробация гидрофобных покрытий проточных частей насосов с целью улучшения эффективности нефтяных магистральных насосов». ООО «НИИ Транснефть». – М., 2016. – 94 с.

4. СТТ 23.080.00 КТН-240-14. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Насосы магистральные и подпорные усовершенствованные. Специальные технические требования (с изменением 1). ООО «НИИ Транснефть». – М., 2014. – 137 с.

5. **Johann Friedrich Gülich.** Centrifugal Pumps. – 2nd ed. – 2010. – 966 p.

6. **Акимов С. В., Ковров А. А.** Одноступенчатый центробежный насос двухстороннего входа // Патент на полезную модель RU193781 U1, опубл. 2019.11.14.