

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-425-439>

УДК 62-137

Повышение эффективности погружных многоступенчатых насосов на основе гидрофобизации поверхностей проточной части

Г. А. Кромм¹⁾, Н. А. Дробницкий¹⁾, А. В. Волков¹⁾, А. А. Дружинин¹⁾,
В. Ю. Ляпин¹⁾, А. В. Трулёв²⁾, И. В. Качанов³⁾, Г. М. Бровка³⁾

¹⁾Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Российская Федерация),

²⁾ООО «Римера-Алнас» (Альметьевск, Российская Федерация),

³⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В работе представлено экспериментальное исследование сборки из пяти ступеней установки электроприводного центробежного насоса (УЭЦН), проточная часть которого модифицирована согласно принципам биомиметики, а именно с помощью эффекта лотоса. В качестве объекта исследования выступал УЭЦН марки 5А-35. Поверхности лопастных систем рабочих колес и выправляющих аппаратов ступеней 5А-35 гидрофобизировались методом нанесения слоев поверхностно активного вещества (ПАВ). Степень гидрофобности рабочих колес оценивалась по величине среднего значения угла смачивания по замерам трех капель в трех точках на поверхности рабочего колеса. Определена шероховатость поверхности исследуемых рабочих колес по среднему арифметическому отклонению профиля Ra и высоты неровностей профиля Rz . Исследовались вопросы, связанные с влиянием модификации ПАВ-покрытием на солеотложение и коррозию. Для этого поверхности исходного и модифицированного рабочих колес подвергались интенсивному принудительному солеотложению в результате длительного пребывания в солевом растворе. Вывод о степени коррозионной стойкости образцов выполнен посредством изменения их массы, которое было обусловлено формированием солевых отложений за 15 ч пребывания в растворе, а также с помощью метода капли. Оба способа показали, что ПАВ-покрытие может служить ингибитором солеотложения, а модифицированное им рабочее колесо насоса имеет повышенную коррозионную стойкость. Так, в ходе сравнительных испытаний на модифицированный образец рабочего колеса за 15 ч выдерживания в насыщенном солевом растворе отложилась меньшая масса соли, чем на исходный образец. Это свидетельствует о том, что слой ПАВ препятствует закреплению солевых отложений на рабочих поверхностях ступени. На модифицированном образце, исследуемом по методу капли, цвет индикатора менялся за 20 мин, а на исходном – за 2 мин. Проведены экспериментальные исследования, в ходе которых определены энергетические параметры работы насосного пакета из пяти ступеней 5А-35 с исходными и модифицированными ПАВ-покрытием рабочими колесами. Исследования показали повышение КПД на 2 % у насосного пакета ступеней с модифицированными

Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Kachanov Igor V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

рабочими колесами. Результаты исследования могут быть полезны в нефтедобывающей, химической отрасли, а также в сфере ЖКХ.

Ключевые слова: эффект лотоса, супергидрофобность, поверхностно-активное вещество, природоподобные технологии, снижение гидравлического сопротивления, ингибитор солеотложений, коррозионная стойкость

Для цитирования: Повышение эффективности погружных многоступенчатых насосов на основе гидрофобизации поверхностей проточной части / Г. А. Кромм [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 5. С. 425–439. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-425-439>

Improving the Efficiency of Submersible Multistage Pumps Based on the Hydrophobization of the Flow Part Surfaces

G. A. Kromm¹⁾, N. A. Drobnitsky¹⁾, A. V. Volkov¹⁾, A. A. Druzhinin¹⁾,
V. Y. Lyapin¹⁾, A. V. Trulev²⁾, I. V. Kachanov³⁾, G. M. Brovka³⁾

¹⁾NRU Moscow Power Engineering Institute (Moscow, Russian Federation),

²⁾Rimera Alnas LLC (Almetyevsk, Russian Federation),

³⁾Belarussian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents an experimental study of an assembly of five stages of an electric centrifugal pump (ECP) installation, the flow part of which is modified according to the principles of biomimetics, namely using the “lotus leaf effect”. The object of the study was a 5A-35 ECP. The surfaces of the blade systems of impellers and guide devices of stages 5 A-35 were hydrophobized using the method of applying surfactant layers. The degree of impellers hydrophobicity was estimated by the wetting angle average value measured by three drops at three different points on the impeller surface. The impellers surface roughness under study was determined by the arithmetic mean profile deviation Ra and the profile height irregularities Rz . The issues related to the surfactant coating modification effect salt deposition and corrosion were studied. For this purpose, the surfaces of the original and modified impellers were subjected to intensive forced salt deposition as a result of prolonged exposure to saline solution. The conclusion about the samples corrosion resistance degree was made by changing their mass, which was due to the salt deposits formation during 15 hours of stay in solution, as well as using the drop method. Both methods have shown that the surfactant coating can serve as a salt deposition inhibitor, and the pump impeller modified by it has increased corrosion resistance. Thus, during comparative tests, a smaller mass of salt was deposited on the modified impeller sample during 15 hours of exposure in saturated saline solution than on the original sample. This indicates that the surfactant layer prevents the salt deposits fixation on the working surfaces of the pump stage. On the modified sample examined by the drop method, the indicator color changed in 20 minutes, and on the original one – in 2 minutes. Experimental studies have been carried out, during which the operation energy parameters of a five stages 5A-35 pumping package with initial and modified surfactant-coated impellers have been determined. The studies have shown a 2 % increase in efficiency in the pumping package of stages with modified impellers. The results of the study can be useful in the oil production, chemical industry, as well as in the housing and communal services sector.

Keywords: lotus leaf effect, superhydrophobicity, surfactant, nature-like technologies, reduction of hydraulic resistance, salt deposition inhibitor, corrosion resistance

For citation: Kromm G. A., Drobnitsky N. A., Volkov A. V., Druzhinin A. A., Lyapin V. Y., Trulev A. V., Kachanov I. V., Brovka G. M. (2024) Improving the Efficiency of Submersible Multistage Pumps Based on the Hydrophobization of the Flow Part Surfaces. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (5), 425–439. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-425-439> (in Russian)

Введение

Установки электроприводного центробежного насоса (УЭЦН), применяемые при добыче нефти, характеризуются низкой быстроходностью – высоким напором и малой подачей, что позволяет производить добычу

пластовой жидкости с большой глубины. Ввиду их конструкционных особенностей среднеинтегральный КПД одной ступени бесштанговых центробежных насосов для нефтедобычи не превышает 55–60 %.

При добыче нефти оборудование находится в контакте с химически активной средой с содержанием механических примесей и абразива. В результате этого в ходе длительной эксплуатации УЭЦН в проточных каналах рабочих колес и направляющих аппаратов возможно образование коррозии и солеотложений, а следовательно, закупоривание рабочих каналов, что снижает эффективность установки, приводит к необходимости преждевременной замены рабочих органов насоса и увеличению простоя установки на период ремонтно-восстановительных работ [1].

Для повышения эффективности эксплуатации УЭЦН возможно применение средств уменьшения парафиносодержащих отложений в подъемных трубах, а также защитных покрытий насосно-компрессорных труб. При этом межремонтный период работы УЭЦН составляет в среднем около года и во многом зависит от степени химической активности перекачиваемой среды. Коррозионный контроль особенно актуален в связи с высоким содержанием воды и коррозионной активностью пластовых флюидов, обусловленной высокой минерализацией и содержанием растворенных кислых примесей (H_2S , CO_2).

Коррозии и образованию солеотложений при разработке и эксплуатации нефтяных скважин подвержена не только проточная часть насосов, но и элементы подземного оборудования. Эти процессы зависят от множества факторов. Основной причиной образования солей является регулирование пластового давления путем искусственного заводнения. Кроме того, продукты коррозии и механические примеси при попадании в солевой раствор являются центрами кристаллизации, т.е. приводят к интенсификации процесса солеотложения [2, 3].

Во избежание отложения солей на поверхностях скважинного оборудования, а также других нежелательных явлений (коррозии, смолисто-парафиновых отложений, образования стойких эмульсий) часто применяется специальное оборудование для подачи нейтрализующих химических реагентов в необходимую точку скважины [2]. Однако для этих дополнительных устройств (средств активной защиты) требуется специальное обслуживание, что влияет на увеличение затрат на эксплуатацию скважины.

Основная цель настоящего исследования – повышение эффективности эксплуатации погружных центробежных насосов бесштангового типа (снижение энергозатрат и увеличение межремонтного периода), изменение геометрии элементов проточной части путем модификации функциональных поверхностей насосов созданием гидрофобных защитных покрытий на основе поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Задачей исследования является сравнительный анализ показателей работы исходной и модифицированной лопастных систем УЭЦН. При выполнении исследований оценивались энергетические показатели ступеней насоса, коррозионная стойкость и процессы солеобразования на поверхностях элементов проточной части в исходном и модифицированном состоянии с использованием ПАВ.

Для достижения поставленных целей предложено применение природоподобной технологии, а именно – эффекта лотоса [4–6]. Лист лотоса

представляет собой природную гидрофобную поверхность, для которой характерны большие значения угла смачивания при контакте капли воды с поверхностью.

Схема рельефа поверхности листа лотоса и характерная величина угла смачивания представлена на рис. 1.

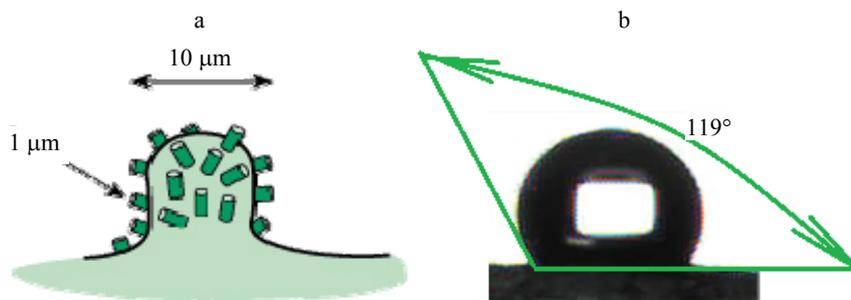


Рис. 1. Схема рельефа ультрагидрофобной поверхности листа лотоса (а) и характерная величина угла смачивания на его поверхности (b)

Fig. 1. Relief diagram of the lotus leaf ultrahydrophobic surface (a) and the characteristic wetting angle value on its surface (b)

При этом поверхность листа сохраняется сухой при скатывании капли и защищена от факторов внешнего воздействия. Гидрофобность листа лотоса обеспечивается его микроструктурированной поверхностью с тонким воскоподобным покрытием [4]. Следует отметить, что гидрофобизация поверхности по механизму эффекта лотоса с использованием ПАВ-покрытий исследовалась ранее в качестве метода снижения гидравлического сопротивления в трубопроводах, а также в одноступенчатых центробежных насосах [5–10].

На функциональных поверхностях лопастной системы аналогичный эффект возможно обеспечить с применением ПАВ-технологий, так как нанесение других покрытий, например полимерных, невозможно ввиду малых размеров проточных каналов рабочих колес скважинных насосов.

Технология применения ПАВ широко внедряется в большой энергетике [11] для задач консервации оборудования в период простоев и ремонтов. В качестве действующего ПАВ в данной работе использовались пленкообразующие амины.

Гидрофобизация функциональных поверхностей исследуемых насосов осуществлялась по технологии, разработанной в НИУ «МЭИ» [12]. В основе этой методики лежит адсорбция металлической поверхностью молекул ПАВ. По своему строению молекула ПАВ дифильна (рис. 2): молекула общей величиной около 26 Å состоит из двух частей – полярной группы амина и неполярного углеводородного радикала.

Полярная группа, придающая молекулам ПАВ значительный дипольный момент и хорошо гидратируемая, обуславливает адсорбцию ПАВ на поверхности металлов в жидкостной среде. Гидрофобизация металлической поверхности с помощью ПАВ происходит в результате ориентированной адсорбции, приводящей к тому, что полярные группы фиксируются на поверхности, а углеводородные радикалы обращены во внешнюю среду, создавая водоотталкивающий слой.

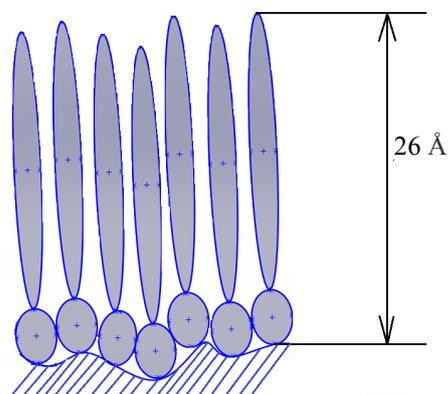


Рис. 2. Схема расположения молекул ПАВ на металлической поверхности

Fig. 2. Arrangement of surfactant molecules on a metal surface

Нанесение ПАВ на функциональные поверхности рабочего колеса и выправляющего аппарата насоса изменяет смачиваемость поверхностей. При этом прогнозируются повышение гидравлического КПД ступени насоса и обеспечение дополнительной защиты от коррозии и солеотложения. Для проверки этого предположения были проведены экспериментальные исследования.

Методы исследования

Объектом исследования выступил электроприводной центробежный насос производства ООО «Римера-Алнас» марки 5А-35 с коэффициентом быстроходности $n_s = 47,17$. Ступень насоса 5А-35 (рис. 3) состоит из двух корпусных стаканов, внутри которых на подшипниках качения вращается рабочее колесо. В каждом стакане перед рабочим колесом расположен направляющий аппарат (четыре лопатки). Рабочее колесо насоса, изготовленное литьем из серого чугуна, состоит из восьми цилиндрических лопастей и ряда вихревых лопаток на внешней стороне ведущего диска.

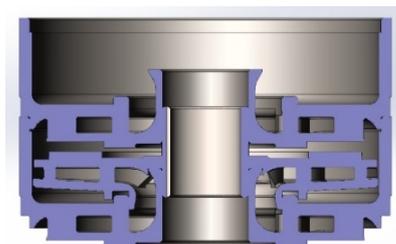


Рис. 3. Ступень насоса 5А-35 в разрезе

Fig. 3. Pump stage 5A-35 in section

При испытаниях экспериментальные характеристики ступеней ЭЦН определялись по показаниям манометров, дисплея расходомера, частотомера и электронных весов.

В зависимости от числа и типоразмера испытываемых ступеней смонтирован изменяемый узел насосной сборки (рис. 4).

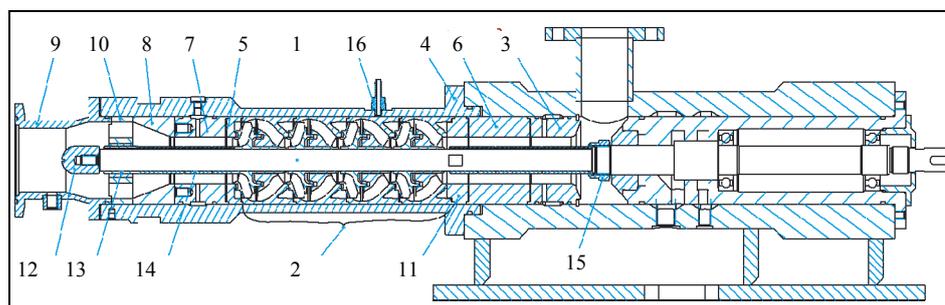


Рис. 4. Схема узла насосной сборки: 1 – вал; 2 – комплект ступеней ЭЦН; 3 – втулка выводящая; 4 – труба; 5 – опора колеса; 6 – проставок; 7 – втулка входная; 8 – конус; 9 – патрубок входной; 10 – подшипник; 11 – втулка опорная; 12 – наконечник; 13 – втулка защитная; 14 – втулка защитная вала; 15 – гайка; 16 – штуцер контроля утечек; позиции 1, 3, 4, 6, 7, 8, 11, 13, 14 – комплект сменных деталей для монтажа различных вариантов узла насосной сборки

Fig. 4. Diagram of the pump assembly unit: 1 – shaft; 2 – set of ECP stages; 3 – outlet sleeve; 4 – pipe; 5 – wheel support; 6 – spacers; 7 – inlet sleeve; 8 – cone; 9 – inlet pipe; 10 – bearing; 11 – support sleeve; 12 – tip; 13 – protective sleeve; 14 – shaft protective sleeve; 15 – nut; 16 – leak control fitting. Positions 1, 3, 4, 6, 7, 8, 11, 13, 14 – a set of interchangeable parts for mounting various versions of the pump assembly unit

Поверхности рабочего колеса и направляющего аппарата центробежного насоса 5А-35 были модифицированы на установке по формированию структурированных покрытий.

Гидрофобизация функциональных поверхностей производилась по отработанным программам, согласно которым гидрофобизируемый образец выдерживался в установке по нанесению ПАВ-покрытий длительное время в объеме циркулирующей рабочей среды с дозированием специально приготовленной эмульсии.

Степень гидрофобности поверхности оценивалась по величине угла контакта водяной капли с поверхностью (по результатам фотосъемки с выдержкой 2 мин).

Экспериментальные исследования образцов ступени насоса с модификациями поверхностей и без модификаций проведены в отделе испытаний ООО «Римера-Алнас» на испытательном стенде СЦН-2 (рис. 5).

Перед проведением экспериментов на испытательном стенде СЦН-2 произведена сборка узла из пяти ступеней насоса 5А-35 в соответствии с рис. 4. После установки узла и подготовки стенда осуществлялась обкатка стенда в течение 25 мин в режиме минимально возможной подачи, близком к закрытой задвижке, с целью достижения максимального давления в гидросистеме стенда.

Для этого открывались задвижка подачи воды из бака 1, вентили 10, краны манометров 3 (рис. 3) и система заполнялась рабочей жидкостью. После заполнения системы перекрывался выходной вентиль 10 и производился пуск электрооборудования, а также травление воздуха из гидросистемы (посредством крана 11). Затем вихревым насосом 14 опорожнялся бак 13 для сбора утечек. После обкатки стенда и отключения вихревого насоса выполнялось получение рабочих характеристик сборки ступеней по показаниям контрольно-измерительных приборов [13].

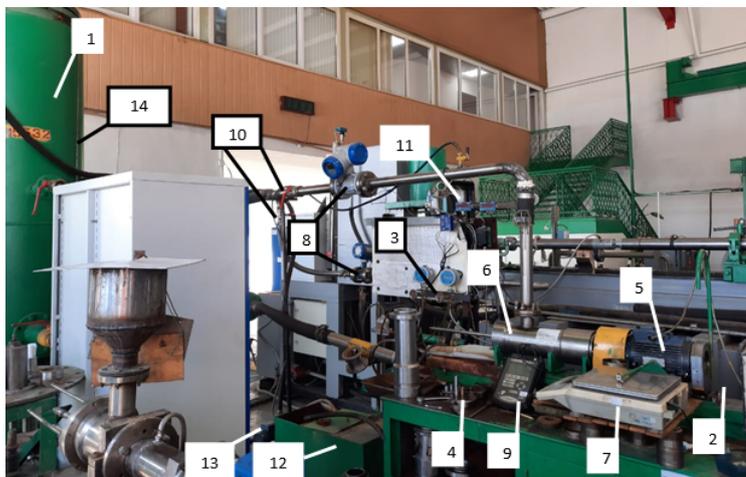


Рис. 5. Общий вид испытательного стенда СЦН-2: 1 – бак; 2 – станина; 3 – стойка с манометрами; 4 – хомут для соединения патрубков; 5 – балансирный электродвигатель (мотор-весы); 6 – насосный модуль, в который монтируются испытываемые ступени; 7 – весы электронные; 8 – расходомеры; 9 – частотомер; 10 – вентили выходные, регулирующие подачу; 11 – кран сброса воздуха из трубопровода; 12 – бак для сбора утечек; 13 – вихревой насос; 14 – уровнемер

Fig. 5. General view of the SCP-2 test stand: 1 – tank; 2 – bed; 3 – rack with pressure gauges; 4 – clamp for connecting pipes; 5 – balancing electric motor (motor scales); 6 – pumping module into which the tested stages are mounted; 7 – electronic scales; 8 – flow meters; 9 – frequency meter; 10 – outlet valves regulating the supply; 11 – air discharge valve from the pipeline; 12 – leak collection tank; 13 – vortex pump; 14 – level gauge

В работе также рассматривалось влияние ПАВ-покрытия на процессы солеотложения и коррозии, являющиеся одними из основных проблем в сфере нефтедобычи. Процессы солеотложения возможно имитировать различными способами:

- испарением рабочей жидкости из проточной части;
- подачей в проточную часть химически активных жидкостей, имитирующих пластовую жидкость;
- подачей углекислого газа в проточную часть (осуществление барботажа) [14].

Для исследования влияния нанесения ПАВ (обработки поверхностей рабочего колеса и направляющего аппарата) на солеотложение применен метод длительного осаждения продуктов солевого раствора (15 ч и более) на элементы проточной части насоса. Образец был помещен в сосуд, залит насыщенным раствором минеральной соли, полученным растворением водой порошка дисульфида магния $MgSO_4$, и выдерживался при комнатной температуре до перехода формируемого отложения в твердое состояние [15].

Данным методом ускоренных испытаний имитировались процессы солеотложения при эксплуатации насоса в составе нефтедобывающей скважины. По результатам осаждения определялись: степень протекания коррозионных процессов по методу капли в соответствии с [16] – замерялось время, при котором индикаторный раствор при нанесении на поверхность менял цвет; степень прироста солевых отложений на поверхностях рабочих

органов насоса – по методу разности масс деталей до и после процесса осаждения.

Результаты исследования

При оценке степени гидрофобности рабочих колес центробежного насоса 5А-35 получены следующие результаты: для одиннадцати исследуемых образцов с исходными поверхностями (до модификации) среднее значение угла смачивания по замерам не более 90° , при этом минимальное значение угла смачивания составляет $33,4^\circ$. На рис. 6 – фото капель водопроводной воды для измерений угла смачивания на образцах с исходной и с модифицированной поверхностями при температуре 20°C , нанесенных на 3-й образец рабочего колеса (рис. 7).

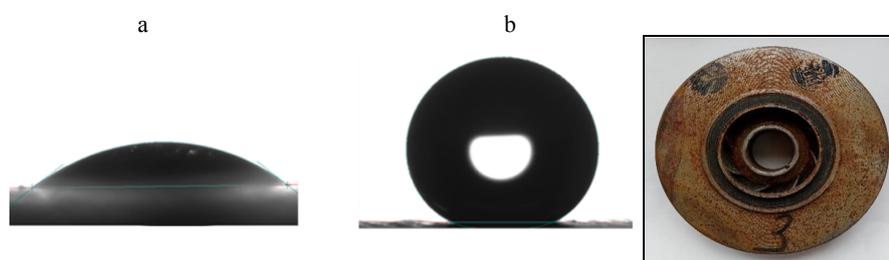


Рис. 6. Фото капель воды для измерений угла смачивания на образце с исходной поверхностью (а) и на образце с модифицированной поверхностью (б)
Fig. 6. Water droplets photos for measuring the wetting angle on a sample with an initial surface (а) and on a sample with a modified surface (б)



Рис. 7. Рабочее колесо насоса 5А-35 (3-й образец)
Fig. 7. The impeller of the pump 5А-35 (the 3rd sample)

В табл. 1 представлены результаты замеров угла контакта капли воды с поверхностью для всех испытуемых образцов. Поверхность необработанного колеса является гидрофильной. Определение среднего угла смачивания основано на трехкратном проведении замеров – по трем каплям для каждого образца до и после обработки ПАВ.

Как следует из данных таблицы, для исходной поверхности рабочего колеса наблюдается широкий разброс значений угла смачивания в зависимости от области нанесения капли. Жидкость наносилась на поверхности с различной шероховатостью, зависящей от механической обработки, и с различной степенью начальной коррозии в пределах одного образца. При этом заметно, что после нанесения ПАВ данный разброс по углам смачиваемости выровнялся. Кроме того, на поверхности исследуемых образцов угол смачивания значительно увеличился: максимальное значение для всех серий замеров составляет $144,4^\circ$, минимальное – $99,0^\circ$. Разброс полученных значений после обработки снизился более чем на 40 %.

Основываясь на результатах известных исследований [17], связанных с оценкой свойств модифицированных поверхностей с измененными характеристиками смачиваемости, в проведенных экспериментальных исследованиях достижение сверхгидрофобной поверхности не представляется возможным по причине того, что отсутствует возможность проведения обработки поверхности проточной части рабочего колеса до требуемого

уровня микрошероховатости. Поэтому в рассматриваемом случае имелась возможность нанесения только ПАВ.

Таблица 1

Среднее значение угла смачивания для 11 образцов рабочих колес насоса 5А-35

The average wetting angle for 11 samples of the pump 5A-35 impellers

| Номер образца / Sample number | Угол смачивания (среднее значение), град. / Wetting angle (average value), degree | |
|----------------------------------|--|---|
| | Исходная поверхность / The initial surface | Поверхность после нанесения ПАВ / Surface after surfactant application |
| 1 | 75,6 | 118,3 |
| | 83,0 | 117,8 |
| 2 | 90,1 | 102,0 |
| 3 | 51,5 | 141,3 |
| | 69,4 | 139,3 |
| 4 | 50,5 | 132,7 |
| 5 | 51,5 | 141,3 |
| | 69,4 | 131,3 |
| 6 | 66,9 | 109,9 |
| 7 | 65,6 | 143,7 |
| | 59,2 | 131,6 |
| 8 | 48,4 | 134,6 |
| 9 | 34,8 | 110,9 |
| | 33,4 | 144,4 |
| 10 | 55,5 | 99,0 |
| 11 | 34,8 | 110,9 |
| | 33,4 | 144,4 |

Следует отметить, что обычно под эффектом лотоса подразумевается формирование сверхгидрофобной поверхности (часто с краевым углом смачивания водой 150° и более [4]), где такие большие значения краевого угла смачивания обеспечиваются двумя факторами – слоем гидрофобного вещества на поверхности и микрошероховатостью поверхности.

Помимо оценки гидрофобности при проведении исследований была определена шероховатость поверхности с применением методики [18]. Были проведены замеры по параметрам Ra (среднее арифметическое отклонение профиля) и Rz (высота неровностей профиля по 10 точкам). Средние значения этих параметров для образцов колес составили: $Ra = 9,3$ мкм; $Rz = 46$ мкм.

На испытательном стенде СЦН-2 проведен ряд экспериментов в соответствии с методикой [13], по которым определены энергетические параметры работы насосного пакета из пяти ступеней 5А-35 и построены рабочие характеристики (пересчитанные на одну ступень). На рис. 8 представлена рабочая характеристика насоса 5А-35 с модифицированными рабочими поверхностями, построенная по результатам испытаний на воде (плотность 1000 кг/м^3) при частоте вращения ротора насоса 2910 мин^{-1} .

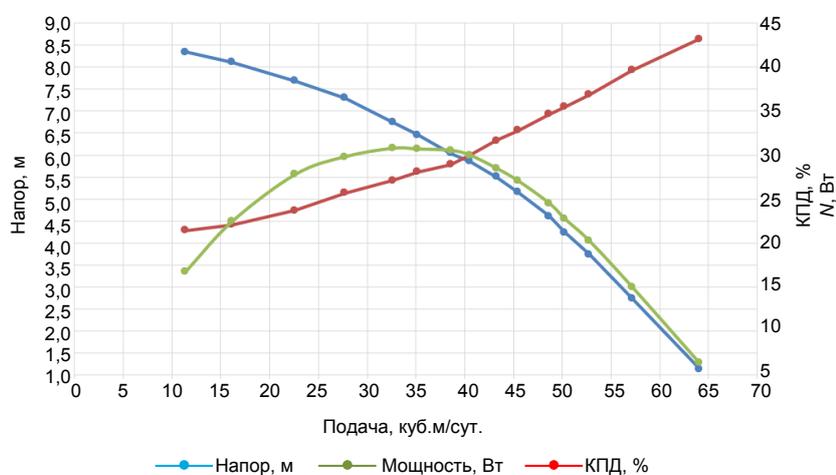


Рис. 8. Рабочая характеристика ступени насоса 5А-35 после обработки ПАВ
Fig. 8. Operating characteristics of a pump 5A-35 stage after surfactant treatment

После построения рабочих характеристик проведено их сравнение по КПД и напору. Из графика рис. 9 видно, что на всем диапазоне подач КПД насоса с гидрофобным покрытием превышает КПД исходного насоса. Максимальное увеличение КПД наблюдается при расчетной подаче $35 \text{ м}^3/\text{сут.}$ и составляет 2 %.

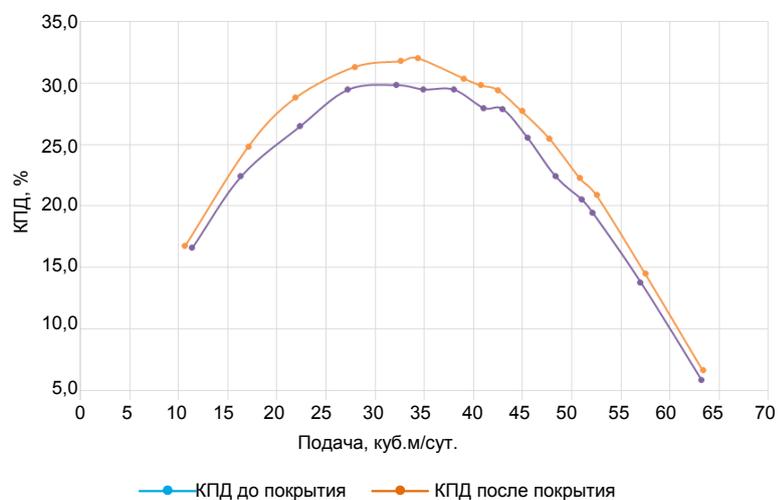


Рис. 9. График КПД ступени насоса 5А-35 до и после обработки ПАВ
Fig. 9. Efficiency graph of a pump 5A-35 stage before and after surfactant treatment

Анализ напорной характеристики насоса после нанесения покрытия согласно рис. 10 свидетельствует, что в области рабочей зоны (от 22 до $37 \text{ м}^3/\text{сут.}$) наблюдается увеличение напора на 1,0–1,5 %.

Таким образом, при нанесении ПАВ на функциональные поверхности рабочих органов гидромашин наблюдается улучшение энергетических характеристик насоса. Данный результат является свидетельством эффектив-

ности применения гидрофобных покрытий для элементов проточной части многоступенчатых центробежных гидромашин.

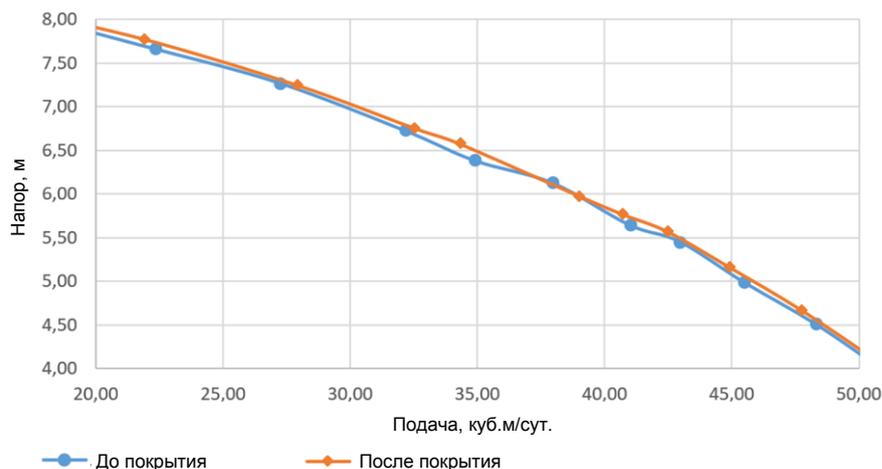


Рис. 10. График напорной характеристики ступени насоса 5А-35 до и после обработки ПАВ
Fig. 10. Graph of the pump 5A-35 stage head characteristics before and after surfactant treatment

Образцы, обработанные ПАВ, меньше подверглись коррозии, чем исходные образцы. Работы [14, 15] указывают на то, что защитное действие покрытий ПАВ основано на снижении адгезии поверхности с осаждающимся на ней слоем солей. Это интенсифицирует унос отложений с защищаемой поверхности потоком рабочей жидкости в процессе эксплуатации УЭЦН. Отложившиеся соли удерживаются в рабочей среде адсорбционными силами. Величина данных сил зависит от энергии свободной поверхности. В связи со снижением поверхностной энергии снижается интенсивность парафиносодержащих отложений, приводящих к закупорке межлопастных каналов.

В табл. 2 и 3 представлены результаты исследований гравиметрическим методом и исследований по методу капли соответственно.

Таблица 2

Гравиметрические исследования

Gravimetric studies

| Масса, г / Weight, g | | |
|--|--|--|
| Исходное колесо / The original impeller | Модифицированное колесо / Modifications. impeller | |
| 120,9677 | 118,9003 | Исх. / Origin |
| | 118,9942 | ПАВ покрытие / Surfactant coating |
| 121,2521 | 118,9942 | После 5 ч / After 5 h |
| 121,2915 | 119,1383 | После 10 ч / After 10 h |
| 121,3412 | 119,1206 | После 15 ч / After 15 h |
| 0,3735 | 0,2203 | Привес за 15 ч / Gain in 15 h |
| 120,9527 | 118,9125 | Без соли / Without salt |
| 0,01500 | -0,0122 | Убыль массы (коррозия) / Loss of mass (corrosion) |

Таблица 3

Исследования методом капли
Studies by the drop method

| Метод капли. Время, с / The "drop" method. Time, sec. | | | | Удельная сорбция, мкг/см ² / Specific sorption micrograms/cm ² |
|--|-----|-----|-----|--|
| Исходное колесо / The original impeller | 100 | 110 | 115 | |
| Модифицированное колесо / Modifications. impeller | 170 | 250 | 360 | 7,35 |

На образцах с покрытием ПАВ за 15 ч солеотложение проявилось в меньшей степени, чем на исходных образцах. Уменьшение массы рабочих колес в процессе осаждения ПАВ связано с протеканием коррозионных процессов, а для обработанных колес – также с уносом части коррозионных отложений с поверхности в процессе нанесения покрытия ПАВ. По изменению цвета индикатора видно, что интенсивность коррозии на образцах купируется и развивается с меньшей интенсивностью, чем на исходных образцах.

Изменение цвета капли индикатора на обработанных образцах (как до процесса осаждения, так и после нее) занимало существенно больше времени – до 20 мин в сравнении с 2 мин для исходных образцов. Этот факт – свидетельство значительного повышения коррозионной стойкости материала колес при модификации поверхности нанесением ПАВ, причем увеличенная коррозионная стойкость поверхностей, обработанных ПАВ, сохраняется и после выдерживания образца в солевом растворе.

Из представленных данных можно сделать вывод, что реализация эффекта лотоса за счет модификации ПАВ элементов проточной части насоса позволяет обеспечить увеличение ресурса и надежности насосного оборудования и соответственно снижение затрат на эксплуатацию, ремонтно-восстановительные работы и увеличение межремонтного периода.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа полученных результатов установлена эффективность гидрофобизации поверхностей деталей в гидромашиностроении на примере пятиступенчатой сборки погружного многоступенчатого центробежного насоса. В ходе экспериментов установлено, что при модификации функциональных поверхностей насоса, выполненных по подобию эффекта лотоса с применением ПАВ, увеличивается суммарный КПД ступени на 1–2 %. Прирост КПД насоса в долгосрочной перспективе является возможностью ощутимого удельного снижения затрат

2. По результатам испытаний на коррозионную стойкость и солеотложение отмечено положительное влияние гидрофобизации поверхности – были снижены коррозия лопастной системы и отложение солей на стенках межлопастных каналов, что позволяет обеспечить увеличение срока эксплуатации насоса, а также исключить ухудшение паспортных характеристик, таких как развиваемый расчетный напор и подача, связанного с «закупоркой» межло-

пастных каналов рабочего колеса и проточной части в целом в результате «запарафинивания» и образования в них солеотложений.

3. Полученные результаты показывают перспективность примененных методов для повышения эффективности и надежности насосного оборудования для нефтедобычи, а в качестве расширения области применения предлагаемого подхода биомиметики (модифицированному изменению смачиваемости функциональных поверхностей) может быть представлен подход к тиражированию и применению данной технологии на иных типах насосного оборудования, эксплуатируемого в сложных условиях для перекачивания химически активных жидкостей, а также для модификации элементов проточной части гидравлических турбин, использующих избыточную энергию потока в магистральных трубопроводах для производства электроэнергии на собственные нужды повысительных насосных станций и/или станций катодной защиты магистральных трубопроводных систем от коррозии [19–21].

Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения Государственного задания № FSWF-2022-0008, вступившего в силу в соответствии с Соглашением № 075-03-2022-138/5 от 02.11.2022.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивашечкин, В. В. Оптимизация работы водозаборов подземных вод с помощью двухколлонных скважин / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 5. С. 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-451-462>.
2. Повышение эффективности эксплуатации центробежных насосов для добычи нефти на месторождении Западный Тикрит (West Tikrit) в Ираке / А. Ф. Ал-шареа [и др.] // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2021. № 6. С. 221–228.
3. Веремеинок, В. В. Методика гидравлического расчета групповых скважинных водозаборов с парными сборными водоводами / В. В. Веремеинок, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 3. С. 268–280. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-268-280>.
4. Bhushan, B. Bioinspired Structured Surfaces / B. Bhushan // Langmuir. 2012. Vol. 28, No 3. P. 1698–1714. <https://doi.org/10.1021/la2043729>.
5. Successive impact of droplets on the superhydrophobic surface / Chenyang Wang [et al.] // International Journal of Multiphase Flow. 2024. Vol. 174. P. 104758. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104758>.
6. Даулетбекова, А. К. Эффект лотоса и биороботы / А. К. Даулетбекова, К. Шварц, М. Сорокин // Вестник евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. Сер. Физика. Астрономия. 2021. Т. 137, № 4. С. 71–75.
7. Расчет трубопроводных систем с учетом степени гидрофобности внутренних поверхностей / М. А. Морозов [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2016. № 4. С. 130–133.
8. Волков, А. В. К вопросу об использовании супергидрофобности для повышения энергоэффективности центробежных насосов / А. В. Волков, А. И. Давыдов, Г. П. Хованов // Насосы & Оборудование. 2009. № 6. С. 48–51.
9. Волков, А. В. Экспериментальные исследования эффекта гидрофобизации твердых поверхностей и элементов центробежных насосов / А. В. Волков, А. И. Давыдов, Г. П. Хованов // Промышленная энергетика. 2010. № 11. С. 41–44.
10. Экспериментальное исследование влияния гидрофобного покрытия на энергоэффективность центробежного насоса в зависимости от коэффициента быстроходности / А. В. Волков [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. № 1 (75). С. 38–41.
11. Интенсификация теплообменных процессов в конденсаторах паровых турбин с использованием поверхностно-активных веществ / А. В. Куршаков [и др.] // Теплоэнергетика. 2014. № 11. С. 17–20.

12. Рыженков, В. А. О повышении эффективности эксплуатации отечественных систем теплоснабжения в современных условиях / В. А. Рыженков // Новости теплоснабжения. 2006. № 9 (73). С. 36–42.
13. Насосы динамические. Методы испытаний. Термины и определения: ГОСТ 6134–2007 (ИСО 9906:1999). Введ. 2008-06-01. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2007. 100 с.
14. Разработка стенда оценки стойкости внутренних защитных покрытий НКТ к неорганическим солеотложениям / Д. В. Берков [и др.] // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22, № 1. С. 160–172. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-1-160-172>.
15. Протасов, В. Н. Методологические основы выбора материалов полимерных покрытий для предотвращения образования значительных отложений парафинов и минеральных солей на внутренней поверхности нефтегазопроводных труб / В. Н. Протасов, А. В. Мурадов // Территория нефтегаз. 2008. № 3. С. 36–43.
16. Электрохимические методы определения стойкости против межкристаллитной коррозии. Термины и определения: ГОСТ 9.914–91. Введ. 1992-01-01. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1991. 17 с.
17. Рыженков, А. В. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на гидравлическое сопротивление трубопроводов систем теплоснабжения и разработка способа снижения энергозатрат при транспортировке теплоносителя: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.14.14 / А. В. Рыженков; Московский энергетический институт. М., 2008. 20 с.
18. Шероховатость поверхности; Параметры, характеристики и обозначения: ГОСТ 2789–73 (СТ СЭВ 638–77). Введ. 01-01-75. М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1975. 14 с.
19. О возможностях применения низконапорных микроГЭС для автономного энергоснабжения технологических устройств / А. Г. Парыгин [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2015. № 10. С. 127–130.
20. Веремеинок, В. В. Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов / В. В. Веремеинок, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 561–578. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-561-578>.
21. Веремеинок, В. В. Моделирование работы скважинного водозабора подземных вод с кольцевым сборным водоводом / В. В. Веремеинок, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 3. С. 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300>.

Поступила 15.05.2024 Подписана в печать 16.07.2024 Опубликована онлайн 30.09.2024

REFERENCES

1. Ivashechkin V. V., Medvedeva J. A. (2022) Optimization of the Operation of Groundwater Intakes Using Two-Column Wells. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (5), 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-451-462> (in Russian).
2. Al-sharea A. F., Kvesko N. G., Almohammad A. M., Kaiser Yu. F. (2021) Improving the Efficiency of Centrifugal Pumps for Oil Production at the West Tikrit Field (Iraq). *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, (6), 221–228 (in Russian).
3. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2024) Hydraulic Calculation Methodology for Group Well Water Intakes with Paired Prefabricated Water Pipelines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (3), 268–280. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-268-280> (in Russian).
4. Bhushan B. (2012) Bioinspired Structured Surfaces. *Langmuir*, 28 (3), 1698–1714. <https://doi.org/10.1021/la2043729>.
5. Wang C., Zhang H., Zhu D., Huang B., Xu Z., Hao P., He F., Zhao H., Zhang X. (2024) Successive Impact of Droplets on the Superhydrophobic Surface. *International Journal of Multiphase Flow*, 174, 104758. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104758>.

6. Dautlebekova A. K., Sorokin M., Schwartz K. (2021) Lotus Effects and Biorobots. *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Physics, Astronomy Series*, 137 (4), 71–75 (in Russian).
7. Morozov M. A., Volkov A. V., Ryzhenkov A. V., Parygin A. G., Lukin M. V., Naumov A. V. (2016) Calculation of the Pipeline Systems According to the Degree of Hydrophobicity of Internal Surfaces. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*, 4, 130–133 (in Russian).
8. Volkov A. B., Davydov A. I., Khovanov G. P. On the Issue of Using Superhydrophobic News to Increase the Efficiency of Centrifugal Pumps. *Nasosy & Oborudovanie = Pumps & Equipment*, (6), 48–51 (in Russian).
9. Volkov A. B., Davydov A. I., Khovanov G. P. (2010) Experimental Studies of the Effect of Hydrophobization of Solid Surfaces and Elements of Centrifugal Pumps. *Promyshlennaya Energetika = Industrial Power Engineering*, (11), 41–44 (in Russian).
10. Volkov A. V., Davydov A. I., Khovanov G. P., Parygin A. G. (2012) An Experimental Study of the Effect of a Hydrophobic Coating on the Energy Efficiency of a Centrifugal Pump Depending on the Speed Coefficient. *Ènergobereženie i Vodopodgotovka = Energy Saving and Water Treatment*, (1), 38–41 (in Russian).
11. Kurshakov A. V., Ryzhenkov A. V., Bodrov A. A., Ryzhenkov O. V., Patakin A. A., Chernov E. F. (2014) Heat Transfer Enhancement in Steam-Turbine Condensers with the Use of Surface-Active Substances. *Thermal Engineering*, 61 (11), 785–789. <https://doi.org/10.1134/S0040601514110020>.
12. Ryzhenkov V. A. (2006) On Improving the Efficiency of Operation of Domestic Heat Supply Systems in Modern Conditions. *Novosti Teplosnabzheniya [Heat Supply News]*, (9), 36–42 (in Russian).
13. State standard 6134-2007 (ISO 9906:1999). *Dynamic Pumps. Test Methods. Terms and Definitions*. Moscow, Federal Agency for Technical Regulation and Metrology: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2007. 100 (in Russian).
14. Berkov D. V., Kostyuk I. I., Yudin P. E., Verevkin A. G. (2024) Development of Test Bench for Evaluation of Resistance of Internal Protective Tubing Coatings to Inorganic Salt Deposits. *Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering*, 22 (1), 160–172. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-1-160-172> (in Russian).
15. Protasov V. N., Muradov A. V. (2008) Methodological Foundations of the Choice of Polymer Coating Materials to Prevent the Formation of Significant Deposits of Paraffins and Mineral Salts on the Inner Surface of Oil and Gas Pipelines. *Territoriya neftegaz [Territory of Neftegaz]*, (3), 36–43 (in Russian).
16. State standard 9.914-91. *Electrochemical Methods for Determining Resistance Against Inter-crystalline Corrosion. Terms and Definitions*. Moscow, USSR Committee for Standardization and Metrology: USSR State Committee for Product Quality Management and Standards, 1991. 17 (in Russian).
17. Ryzhenkov A. V. (2008) *Investigation of the Effect of Surfactants on the Hydraulic Resistance of Pipelines of Heat Supply Systems and the Development of a Method for Reducing Energy Consumption during Transportation of a Coolant* [dissertation]. Moscow. 20 (in Russian).
18. State standard 2789-73 (Comecon Standard 638-77). *Surface Roughness; Parameters, Characteristics and Designations*. Moscow, USSR State Committee for Product Quality Management and Standards: The State Committee of Standards of the Council of Ministers of the USSR, 1975. 14 (in Russian).
19. Parygin A. G., Volkov A. V., Naumov A. V., Druzinin A. A., Vihlantzev A. A. (2015) About the Opportunities the Application of the Low Head Micro Hydraulic Power Plants for the Autonomous Power Supply of the Technological Equipment of the Oil Pipelines. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*, (10), 127–130 (in Russian).
20. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2020) The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Scheme for Prefabricated Water Conduits. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 561–578. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-561-578> (in Russian).
21. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2023) Simulation of the Operation of a Borehole Groundwater Intake with an Annular Prefabricated Conduit. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (3), 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300> (in Russian)