

Расчет напорной и мощностной характеристик конического насоса при работе на воде

Calculation of pressure and power characteristics on water of a tapered pump

A.I. Sorokin¹, I.V. Zolotarev^{1,2}, D.A. Polenkov¹

¹Novomet-Perm JSC, RF, Perm

²Perm State University, RF, Perm

E-mail: Aleksandr.Sorokin@novometgroup.com

Keywords: tapered pump, negative pump head zone, electric submersible pump (ESP) operation zone, optimization of ESP operation, selection of pumping equipment

Optimal pumping equipment arrangement is one of the key tasks in the modern oil industry. The article considers the characteristics of a tapered pump. The conclusions are made that can be used in the selection of equipment. It is noted that the equipment is not always optimally matched to the well. Situations arise when any section of the pump starts operating outside the operating range, especially for non-standard equipment layouts such as a tapered pump. The performance of the tapered pump section in the negative pump head zone is studied insufficiently. This is the main reason for carrying out experiments and clarifying calculation algorithms. Experimental confirmation of the characteristics of a tapered pump as an algebraic sum of the characteristics of each section is provided. The authors describe a research of the characteristics of a tapered pump manufactured by Novomet-Perm, both in the positive and negative pump head zone at various frequencies. Also the operation of the upper section beyond the right boundary was analyzed. During the analysis it was found that in certain operating modes, processes occur that reduce the performance of equipment. In some situations, the deterioration of the installation increases. This type of operation is undesirable, because it leads to decrease in service life and should be avoided. The article provides recommendations on how these undesirable modes can be avoided for different frequencies and pumps.

В настоящее время на многих нефтяных месторождениях при эксплуатации скважин применяются установки электроцентробежных насосов (УЭЦН) [1]. ЭЦН представляет собой устройство, состоящее из приемного модуля и последовательно соединяемых ступеней. Иногда используются конические насосы, имеющие ступени одного габарита, но разной производительности, объединенные в секции. Снизу устанавливается секция с большей производительностью, сверху – с меньшей. Насосы конического типа применяются более 50 лет. Ранее они назывались комбинированными [2], определение «конические» получили в зарубежной литературе [3]. Секции насоса необходимо подбирать так, чтобы рабочие зоны их характеристик пересекались [4, 5]. В работе [4] рассматривается ситуация, когда

А.И. Сорокин¹,
И.В. Золотарев^{1,2}, к.ф.-м.н.,
Д.А. Поленков¹

¹АО «Новомет-Пермь»

²Пермский гос. национальный
исследовательский университет

Адрес для связи: Aleksandr.Sorokin@novometgroup.com

Ключевые слова: конический насос, зона отрицательного напора, рабочая зона электроцентробежного насоса (ЭЦН), оптимизация работы установки ЭЦН (УЭЦН), подбор оборудования

Для цитирования: Сорокин А.И., Золотарев И.В., Поленков Д.А. Расчет напорной и мощностной характеристик конического насоса при работе на воде // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 12. – С. 143-146. – <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-12-143-146>
Sorokin A.I., Zolotarev I.V., Polenkov D.A. Calculation of pressure and power characteristics on water of a tapered pump (In Russ.). Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry, 2023, No. 12, pp. 143-146, DOI: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-12-143-146>

верхняя секция начинает работать в зоне отрицательного напора, т.е. создавать сопротивление нижней секции.

Большую работу по исследованию конических насосов выполнил Ш.Р. Агеев [1, 6]. В своих работах он показал преимущества использования конического насоса по сравнению с серийным:

– уменьшение потребляемой насосом мощности, что снижает температуру двигателя и кабельной линии и повышает надежность;

– использование полезной работы газа при подъеме газожидкостной смеси (ГЖС) в НКТ по сравнению с газосепаратором, что повышает эффективность;

– в некоторых случаях возможность отказа от применения газосепаратора.

В работах [7, 8] приведены следующие преимущества конических компоновок насоса:

– ступени с большей производительностью влияют на коэффициент напора ступеней с меньшей производительностью;

– могут быть универсальными для эффективной откачки ГЖС.

При водогазовом воздействии на пласт одним из перспективных методов закачки смеси является применение насосно-эжекторных систем с дожимными многоступенчатыми центробежными насосами [9–11], в качестве которых целесообразно использовать конические насосные компоновки при высоких входных газосодержаниях [11]. Конические насосы также используются при удалении воды из газовых скважин. Данный метод считается одним из самых эффективных при откачке жидкости в агрессивных, загазованных средах [12].

Одной из основных задач для нефтедобывающих компаний является оптимальная добыча ГЖС. Для ее решения необходимо точно определять множество параметров УЭЦН и смеси. Безусловно, на свойства перекачиваемой смеси в первую очередь влияют характеристики насоса, и, как следствие, важно правильно определять его потребляемую мощность и развиваемый напор. Для этого в АО «Новомет-Пермь» разработана программа выбора оборудования PumpSite, основанная на проверенных практикой и временем алгоритмах. Однако разработка новых типов оборудования, например, такого как установка на грузонесущем кабеле Colibri ESP [13], обуславливает необходимость создания новых методик или повышения точности существующих. Одной из методик, требующих усовершенствования, является методика расчета параметров конического насоса в УЭЦН.

В данной статье рассмотрены результаты анализа работы верхней секции насоса в зоне отрицательного напора и верификации алгоритма расчета конического насоса в зоне отрицательного напора в программе выбора оборудования PumpSite (АО «Новомет-Пермь»).

Односекционный насос

Потребляемая мощность и создаваемый напор односекционного ЭЦН при определенной подаче воды рассчитываются на основе экспериментально полученной мощностной N_B и напорной H_B характеристик при работе на воде, которые, как правило, аппроксимируются полиномами 9-й степени [7]

$$N_B = a_0 + a_1 Q_{ср.в} + a_2 (Q_{ср.в})^2 + \dots + a_9 (Q_{ср.в})^9; \quad (1)$$

$$H_B = b_0 + b_1 Q_{ср.в} + b_2 (Q_{ср.в})^2 + \dots + b_9 (Q_{ср.в})^9, \quad (2)$$

где $Q_{ср.в}$ – средняя подача воды, м³/сут; a_0 – a_9 – размерные коэффициенты мощностной характеристики; b_0 – b_9 – размерные коэффициенты напорной характеристики.

При использовании насоса на другой частоте выполняется пересчет его подачи $Q_{вл}$, напора $H_{вл}$ и мощности $N_{вл}$ [1]

$$Q_{вл} = Q_B n_{тек} / n_{ном}; \quad (3)$$

$$H_{вл} = H_B (n_{тек} / n_{ном})^2; \quad (4)$$

$$N_{вл} = N_B (n_{тек} / n_{ном})^3, \quad (5)$$

где Q_B – подача при номинальной частоте вращения, м³/сут; H_B – напор при номинальной частоте вращения, м; N_B – мощность при номинальной частоте вращения, кВт; $n_{тек}$, $n_{ном}$ – соответственно текущая и номинальная частота вращения вала насоса, мин⁻¹.

Конический насос

Для исследования характеристик конического насоса в зоне отрицательного напора использовались две секции одного габарита с номинальными подачами, различающимися более чем в 2 раза, чтобы их рабочие диапазоны не пересекались. Для секции ВНН5А-700 подача изменяется от 500 до 900 м³/сут, для секции ЭЦН5А-320 – от 240 до 400 м³/сут. Обе секции производства компании АО «Новомет-Пермь», ВНН5А-700 содержит 37 ступеней, ЭЦН5А-320 – 21 ступень.

Методика эксперимента заключалась в замере напорной и мощностной характеристик секций ВНН5А-700 и ЭЦН5А-320, сначала каждой отдельно, а затем объединенных в коническую компоновку, при частоте вращения 2910 (номинальная) и 4500 мин⁻¹. Нижней в компоновке являлась секция ВНН5А-700, верхней – ЭЦН5А-320.

Схема экспериментального стенда показана на рис. 1. Напор определялся как разница давлений на выкиде и приеме насоса, измеряемых с помощью датчиков 3, мощность – по показаниям датчика крутящего момента 2 и частоты вращения вала.

На основании экспериментальных данных для секций ВНН5А-700 и ЭЦН5А-320 получены полиномы, которые описывают зависимость напора, мощности от подачи каждой секции отдельно. Затем определены суммарный напор и мощность конического насоса, рассчитанные как алгебраические суммы для каждой секции, которые необходимы для сравнения с замеренными характеристиками. На рис. 2 приведены характеристики напора и мощности для секций ВНН5А-700, ЭЦН5А-320, а также конического насоса.

В диапазоне подач от 0 до 550 м³/сут обе секции работают в зоне положительного напора (см. рис. 2, а). При этом верхняя секция повышает напор нижней на величину собственного напора. Начиная с подачи 550 м³/сут, верхняя секция ЭЦН5А-320 работает в зоне отрицательного напора и создает сопротивление для нижней секции, которое достигает 150 м, что подтверждается экспериментальными данными со средней погрешностью 2 %.

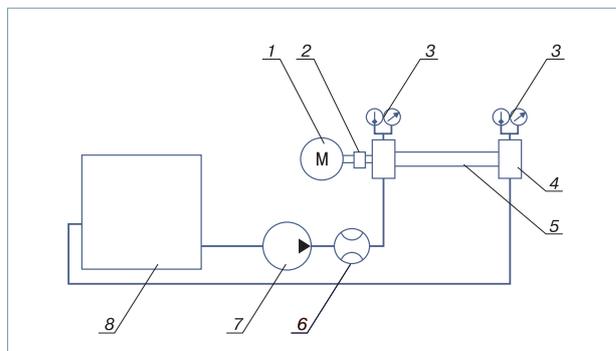


Рис. 1. Гидравлическая схема стенда:

1 – электродвигатель; 2 – датчик крутящего момента; 3 – датчики давления и температуры (две одинаковые пары); 4 – регулировочная задвижка; 5 – исследуемый насос; 6 – расходомер; 7 – насос подпорный; 8 – система терморегулирования

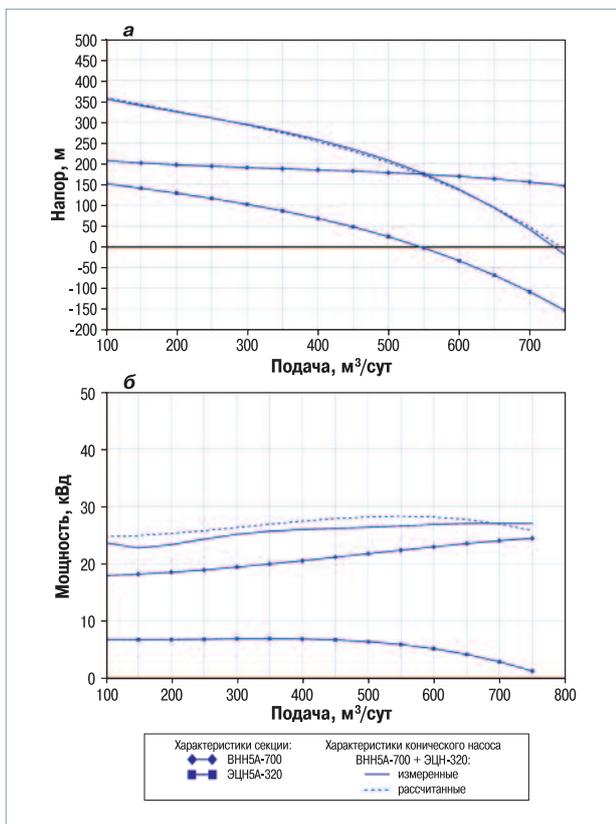


Рис. 2. Зависимость напора (а) и мощности (б) от подачи при частоте вращения 2910 мин⁻¹

При анализе полученных результатов установлено, что рассчитанная мощность конического насоса в диапазоне подач от 550 до 750 м³/сут снижается, а измеренная – начинает увеличиваться (рис. 2, б). Для того, чтобы проанализировать этот эффект, определена оптимальная точка работы конического насоса (подача 450 м³/сут) по зависимости к.п.д. от подачи при номинальной частоте вращения (рис. 3, а) и выполнен расчет, который показал, что расхождение начинается со значения, превышающего оптимальную точку работы на 22 %.

На рис. 4 приведены зависимости напора и мощности от подачи для секций ВНН5А-700, ЭЦН5А-320 и конического насоса при частоте вращения 4500 мин⁻¹. Напорная характеристика конического насоса пересекает ось подач при подаче 1150 м³/сут. Анализируя рис. 4, можно сделать аналогичные выводы, как и для характеристик при частоте вращения 2910 мин⁻¹. Рассматривая мощностные характеристики (см. рис. 4, б), особое внимание следует уделить тому, что при подаче более 900 м³/сут измеренная мощность увеличивается от 89,6 до 105,45 кВт. При этом мощностная характеристика конического насоса, полученная аналитическим методом, данный рост не учитывает. Как и для частоты вращения 2910 мин⁻¹, выполнен анализ, который показал, что увеличение мощности начинается с подачи, превышающей оптимальную (700 м³/сут) на 28,5 % (см. рис. 3, б).

Выявленная закономерность объясняется тем, что энергия потока жидкости поднимает часть рабочих колес, которые начинают соприкасаться с направляющими аппаратами. Между рабочими колесами возникает трение, что приводит к значительному увеличению потребляемой мощности и повышенному износу,

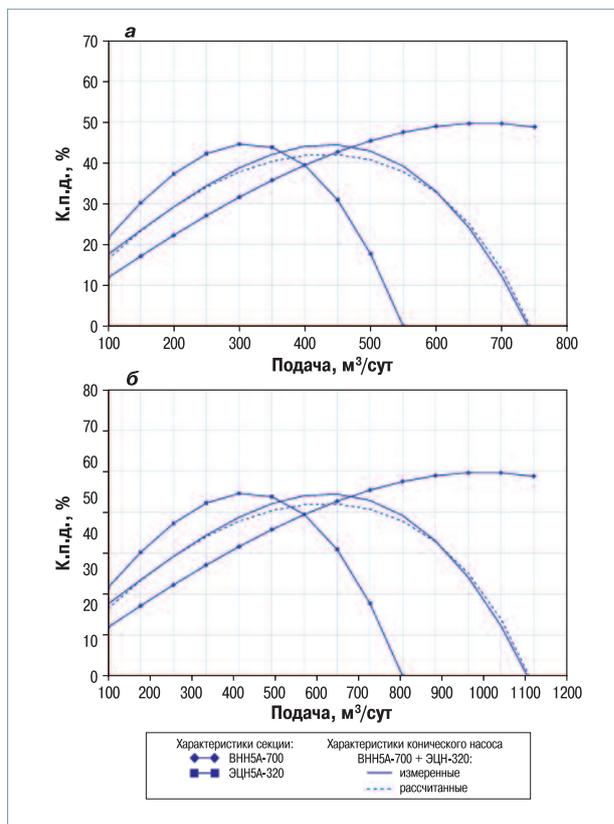


Рис. 3. Зависимость к.п.д. от подачи при частоте вращения 2910 (а) и 4500 (б) мин⁻¹

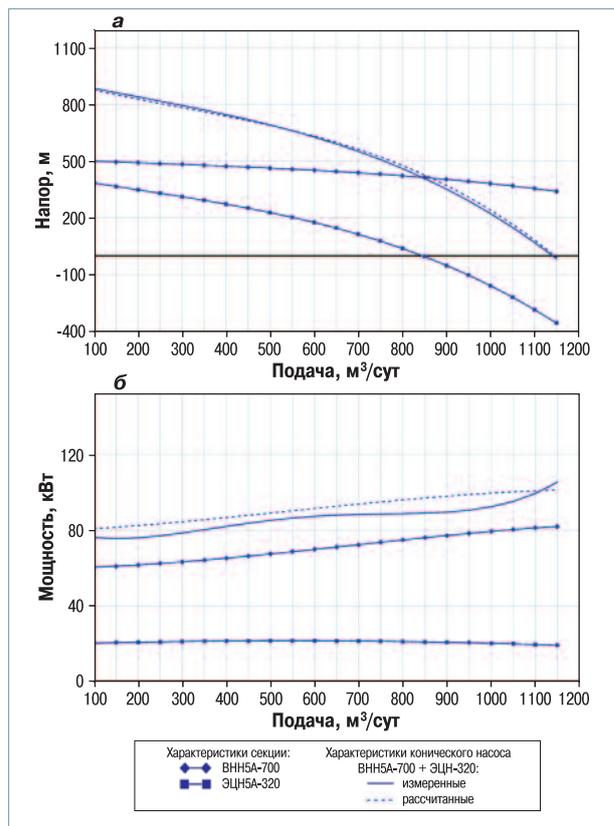


Рис. 4. Зависимость напора (а) и мощности (б) от подачи при частоте вращения 4500 мин⁻¹

а также сокращает срок эксплуатации. Исходя из значений 22 и 28,5 %, рекомендуется не превышать подачу более чем на 25 % при работе на других частотах (отмеченное относится и к другим насосам).

Выводы

1. При эксплуатации верхней секции в зоне отрицательного напора напор конического насоса снижается по сравнению с напором, создаваемым нижней секцией, что свидетельствует о влиянии сопротивления верхней секции.

2. Оптимальная точка характеристики конического насоса смещается влево относительно среднего значения по двум секциям (ближе к оптимальной точке верхней секции). Величина смещения совпадает с расчетным значением, к.п.д. отличается в среднем на 5 %, что позволяет использовать теоретическое построение характеристик конического насоса в программах выбора оборудования, например, PumpSite.

3. Расчетные характеристики с достаточной для работы погрешностью соответствуют замеренным, поскольку на практике принято считать, что расхождение при выборе насоса не должно превышать 10 %.

4. Зафиксирован рост потребляемой мощности конического насоса на частоте 2910 и 4500 мин⁻¹ при работе верхней секции в зоне отрицательного напора, начиная с подачи соответственно 550 и 900 м³/сут. Это объясняется всплыванием рабочих колес и их трением о направляющие аппараты. Потребляемая мощность увеличивается при подаче, превышающей оптимальную на 25 %. Такой режим эксплуатации является нежелательным, так как приводит к повышенному износу. Полученные результаты рекомендуется использовать в программах выбора оборудования PumpSite при расчете конического насоса.

Список литературы

1. Ageev Ш.Р., Григорян Е.Е., Макиенко Г.П. Установки лопастных насосов для добычи нефти и их применение. Энциклопедический справочник. – Пермь: ООО «Пресс-Мастер», 2007. – 645 с.
2. Миронов Ю.С. Снижение вредного влияния свободного газа на работу погружного центробежного насоса // Нефтяное хозяйство. – 1969. – № 6. – С. 57–59.
3. Swetnam J.C., Sackash M.L. Performance Review of Tapered Submersible Pumps in the Three Bar Field // Journal of Petroleum Technology. – 1978. – V. 30(12). – p. 1781–1787. – <https://doi.org/10.2118/6854-PA>
4. Zhou D., Sachdeva R. Design Tapered Electric Submersible Pumps For Gassy Wells // SPE-113661-MS. – 2008. – <https://doi.org/10.2118/113661-MS>
5. Research Progress and Prospects of Multi-Stage Centrifugal Pump Capability for Handling Gas-Liquid Multiphase Flow: Comparison and Empirical Model Validation / A. Ali, J. Yuan, F. Deng [et al.] // Energies. – 2021. – V. 14(4). – Article No. 896. – <https://doi.org/10.3390/en14040896>
6. Ageev Ш.Р. Конический насос как средство повышения эффективности работы и надежности ЭЦН при откачке газожидкостной смеси // Доклады XI Всероссийской технической конференции ОАО «АЛНАС». – М.: АЛНАС, 2002. – С. 1–14.
7. Labakh N. Результаты стендовых испытаний двухпакетных конусных электроцентробежных насосов на модельной газожидкостной смеси // Нефть, газ и бизнес. – 2015. – № 2. – С. 60–62.
8. Горидько К.А., Билалов Р.Р., Вербицкий В.С. Экспресс-оценка эффективности применения конического электроцентробежного насоса при откачке газожидкостных смесей из скважины. Ч.1 // Нефтепромысловое дело. – 2021. – № 2. – С. 43–48.
9. Дроздов А.Н. Исследования характеристик насосов при откачке газожидкостных смесей и применение полученных результатов для разработки технологий водогазового воздействия // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 9. – С. 108–111.
10. Study of Suppression of Gas Bubbles Coalescence in the Liquid for Use in Technologies of Oil Production and Associated Gas Utilization / A.N. Drozdov, N.A. Drozdov, N.F. Bunkin, V.A. Kozlov // SPE-187741-MS. – 2017. – <https://doi.org/10.2118/187741-MS>
11. Дроздов А.Н., Горелкина Е.И. Разработка насосно-эжекторной системы для реализации водогазового воздействия на пласт с использованием попутного нефтяного газа из затрубных пространств добывающих скважин // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 191–201. – <https://doi.org/10.31897/pmi.2022.34>
12. Unlock the Liquid Loaded Gas Wells with ESP Technology: The Successful ESP Dewatering Application in China Sichuan Gas Field / Y. Peng, T. Liao, Y. Kang [et al.] // IPTC-18801-MS. – 2016. – <https://doi.org/10.2523/IPTC-18801-MS>
13. Развитие отечественных технологий в области эксплуатации морских скважин Арктического шельфа России / Д. Прищепо, Е. Хрулева, А. Пономарев [и др.] // Территория Нефтегаз. – 2019. – №3. – С. 56–59.

References

1. Ageev Sh.R., Griгорян E.E., Makienko G.P., *Rossiyskie ustanovki lopastnykh nasosov dlya dobychi nefti i ikh primeneniye* (Russian vane pumping systems for oil recovery and their use), In: "Entsiklopedicheskiy spravochnik" (Encyclopedic reference book), Perm: Press-master Publ., 2007, 645 p.
2. Mironov Yu.S., *Reducing the harmful effects of free gas on the operation of a submersible centrifugal pump* (In Russ.), Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry, 1969, no. 6, pp. 57–59.
3. Swetnam J.C., Sackash M.L., *Performance review of tapered submersible pumps in the three bar field*, Journal of Petroleum Technology, 1978, V. 30(12), pp. 1781–1787, DOI: <https://doi.org/10.2118/6854-PA>
4. Zhou D., Sachdeva R., *Design tapered electric submersible pumps for gassy wells*, SPE-113661-MS, 2008, DOI: <https://doi.org/10.2118/113661-MS>
5. Ali A., Yuan J., Deng F. et al., *Research progress and prospects of multi-stage centrifugal pump capability for handling gas-liquid multiphase flow: comparison and empirical model validation*, Energies, 2021, V. 14(4), Article no. 896, DOI: <https://doi.org/10.3390/en14040896>
6. Ageev Sh.R., *Konicheskiy nasos kak sredstvo povysheniya effektivnosti raboty i nadezhnosti ETsN pri otkachke gazozhidkostnoy smesi* (Conical pump as a means of increasing the operating efficiency and reliability of ESPs when pumping gas-liquid mixtures), Reports of the XI All-Russian Technical Conference of ALNAS JSC, Moscow: Publ. of ALNAS, 2002.
7. Labakh N., *Results of research of two-package "conical" configuration of the electrocentrifugal pump when pumping gas-liquid mix* (In Russ.), Neft', gaz i biznes, 2015, no. 2, pp. 60–62.
8. Gorid'ko K.A., Bilalov R.R., Verbitskiy V.S., *Express evaluation of the efficiency of a tapered electric submersible pump use when pumping gas-liquid mixtures from a well. Part 1* (In Russ.), Neftepromyslovoe delo, 2021, no. 2, pp. 43–48.
9. Drozdov A.N., *Investigations of the submersible pumps characteristics when gas-liquid mixtures delivering and application of the results for SWAG technologies development* (In Russ.), Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry, 2011, no. 9, pp. 108–111.
10. Drozdov A.N., Drozdov N.A., Bunkin N.F., Kozlov V.A., *Study of suppression of gas bubbles coalescence in the liquid for use in technologies of oil production and associated gas utilization*, SPE-187741-MS, 2017, DOI: <https://doi.org/10.2118/187741-MS>
11. Drozdov A.N., Gorelkina E.I., *Development of a pump-ejector system for SWAG injection into reservoir using associated petroleum gas from the annulus space of production wells* (In Russ.), Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute, 2022, V. 254, pp. 191–201, DOI: <http://doi.org/10.31897/pmi.2022.34>
12. Peng Y., Liao T., Kang Y. et al., *Unlock the liquid loaded gas wells with ESP technology: The successful ESP dewatering application in China Sichuan gas field*, IPTC-18801-MS, 2016, DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-18801-MS>
13. Prishchepo D., Khruleva E., Ponomarev A. et al., *Development of domestic technologies of offshore wells operation in the Arctic shelf of Russia* (In Russ.), Territoriya Neftegaz, 2019, no. 3, pp. 56–59.