

Научная статья

УДК 621.671.22

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-23-28

Овчинников Николай Петрович

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

E-mail: ovchinnlar1986@mail.ru

АНАЛИЗ УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ СЕКЦИОННЫХ НАСОСОВ ГЛАВНОЙ ВОДООТЛИВНОЙ УСТАНОВКИ ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА «УДАЧНЫЙ»**Информация о статье**

Поступила:

05 мая 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 октября 2022 г.

Принята к печати:

04 октября 2022 г.

Ключевые слова:

однопоточный насос, двухпоточный насос, рудник, узел гидравлической пяты, подшипник, коэффициент готовности

Аннотация.

Водоотлив является одним из наиболее ответственных технологических процессов при добыче полезных ископаемых подземным способом. На подземных рудниках и шахтах Российской Федерации наиболее распространенным типом центробежных насосов в системах главного и участкового водоотлива является однопоточный секционный насос. В настоящее время многие заводы-производители насосного оборудования активно продвигают двухпоточные секционные насосы в отечественные предприятия горнодобывающей отрасли. Цель настоящей работы заключается в проведении сравнительно-сопоставительного анализа уровня надежности одно- и двухпоточных секционных насосов на примере главной водоотливной установки подземного кимберлитового рудника «Удачный». Установлено, что основными конструктивными элементами однопоточного секционного насоса, определяющими его уровень надежности, являются целевые уплотнения рабочих колес и узел гидравлической пяты, в случае с двухпоточным – роторные втулки. Доказана тесная связь между подшипниковыми узлами однопоточного секционного насоса и развиваемого им напора. Установлено, что значения коэффициента готовности одно- и двухпоточных секционных насосов мало отличаются друг от друга при работе на загрязненной и химически активной шахтной воде.

Для цитирования: Овчинников Н.П. Анализ уровня надежности секционных насосов главной водоотливной установки подземного рудника «удачный» // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 5 (163). С. 23-28. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-23-28

Введение. В настоящее время на подземных рудниках и шахтах Российской Федерации наиболее распространенным типом центробежных насосов является однопоточный секционный насос. Практика показывает, что этот тип насосов имеет

ряд недостатков в плане конструкции, что негативно сказывается на эффективности его эксплуатации [1-4].

В публикациях [5, 6] указывается на определенное превосходство двухпоточных секционных

Таблица 1. Краткая информация о насосах.

Table 1. Brief information about pumps.

Показатель	Модель секционного насоса		
	ЖН-200	ЦНС(К) 350-1100	GP-200
Фирма-производитель	«Mackley Pumps»	ООО «Линк-Продукт»	АО «ГМС Ливгидромаш»
Количество единиц	5	3	2
Номинальная подача, м³/ч	350	350	350
Номинальный напор, м	1100	1100	1050
Конструкция насоса	Однопоточный	Однопоточный	Двухпоточный

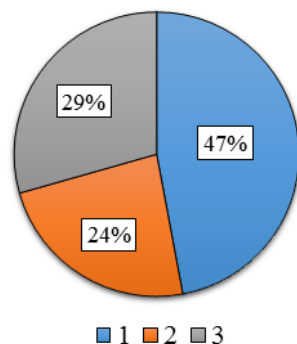


Рис. 1. Распределение отказов заводских секционных насосов модели JSH-200 по деталям: 1 – узел гидравлической пяты; 2 – торцевые уплотнения; 3 – подшипниковые узлы

Fig. 1. Distribution of failures of factory sectional pumps of the JSH-200 model by parts: 1 – hydraulic balancing unit; 2 – seals; 3 – bearing units

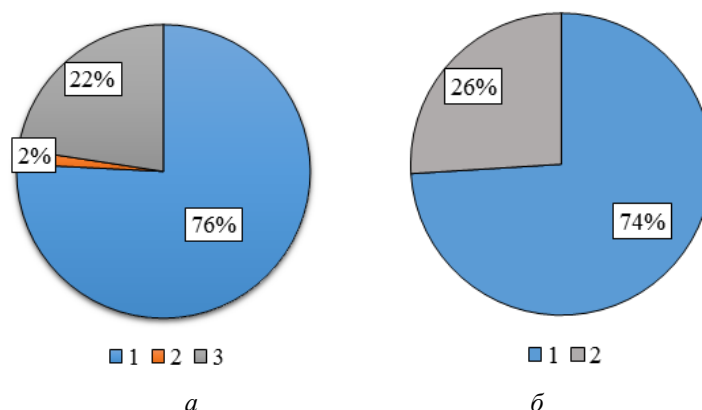


Рис. 2. Распределение отказов модернизированных секционных насосов модели JSH-200 (а) и заводских секционных насосов модели НЦС(К) 350-1100 (б) по деталям: 1 – узел гидравлической пяты; 2 – торцевые уплотнения; 3 – подшипниковые узлы

Fig. 2. Distribution of failures of upgraded sectional pumps JSH-200 (a) and factory sectional pumps NCS(K) 350-1100 (b) by parts: 1 – hydraulic balancing unit; 2 – seals; 3 – bearing units

насосов (насосы с оппозитным расположением рабочих колес) над однопоточными. В тоже время в этих работах отсутствует информация о недостатках таких насосов, что, скорее всего, связано с малым накопленным объемом практического материала по их эксплуатации в горнодобывающей промышленности.

Главная водоотливная установка подземного кимберлитового рудника «Удачный» АК «АЛРОСА» (ПАО) к настоящему моменту времени выступает некой экспериментальной площадкой, позволяющей выполнить сравнительно-сопоставительный анализ уровня надежности одно- и двухпоточных секционных насосов от различных фирм-производителей (табл. 1) при их работе на загрязненной и химически активной шахтной воде (рассоле) [3, 4].

Насосы модели JSH-200 и НЦС(К) 350-1100.

Первоначально на вышеуказанный рудник были поставлены 5 однопоточных секционных насосов модели JSH-200 английской фирмы «Mackley Pumps», которые хорошо себя зарекомендовали с точки зрения надежности в атомной энергетике ряда европейских стран.

Результаты вибро- и тепловизионной диагностики технического состояния подшипниковых

узлов, которые свидетельствуют, что уже после нескольких часов наработки их техническое состояние у четырех из пяти насосов оценивалась как предельно допустимое [7].

К преждевременному выходу из строя подшипниковых узлов повлекли их частичные разрушения, возникшие в процессе доставки насосного оборудования от поставщика к заказчику [8].

Как видно из рисунка 1, наименее надежным элементом в конструкции рассматриваемых насосов является узел гидравлической пяты, отвечающий за уравнивание осевой нагрузки.

Основной причиной частых отказов данного устройства является обширный многофакторный износ поверхностей ее деталей – подпятника и разгрузочного диска [9]. Под их предельным износом следует понимать суммарное истирание рабочих поверхностей от 3 мм и выше.

Преждевременные отказы торцевых уплотнений являлись результатом неправильной консервации насосов. Из них не была своевременно слита вода, которая замерзла и привела к разрушению внутренних трущихся деталей торцевых уплотнений [6].

Согласно результатам статистической обработки практического материала установлено, что фактическая средняя наработка на отказ заводских

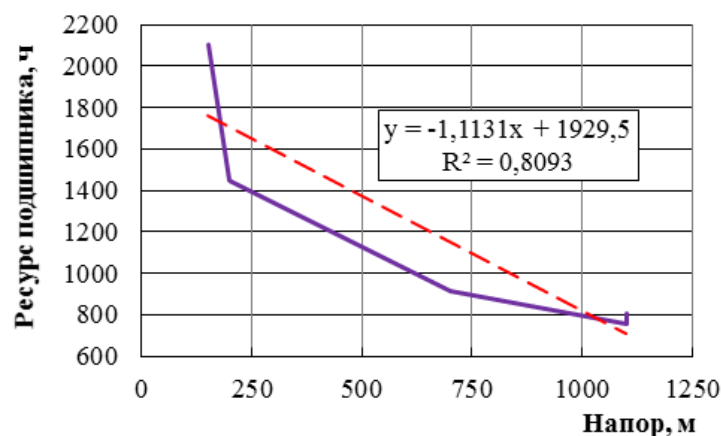


Рис. 3. Зависимость ресурса подшипников от напора секционного насоса и ее аппроксимация линейным трендом

Fig. 3. The dependence of the bearing life on the pressure of the sectional pump and its approximation by a linear trend

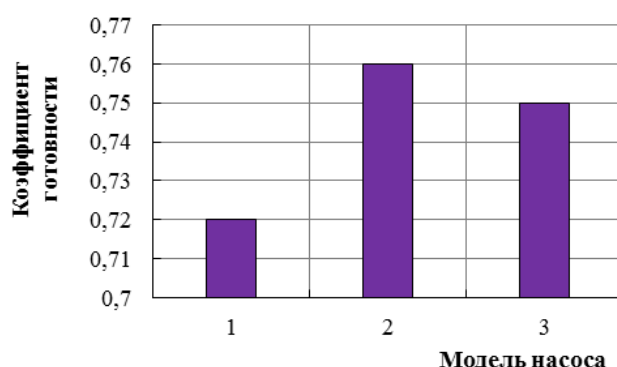


Рис. 4. Коэффициент готовности по моделям секционных насосов: 1 – JSH-200; 2 – НЦС(К) 350-1100; 3 – GP-200

Fig. 4. Availability coefficient by sectional pump models: 1 – JSH-200; 2 – NCC(K) 350-1100; 3 – GP-200

насосов модели JSH-200 составила 370 ч, при плановой – 1000 ч. Гарантийный средний ресурс до очередного капитального ремонта должен был составлять не менее 10000 ч. В действительности его фактическое среднее значение составило 1332,2 ч. Преждевременному выходу заводских насосов в капитальные ремонты в преобладающей доле случаев способствовал интенсивный износ щелевых уплотнений рабочих колес, влекущий за собой заметное снижение производительности насоса (на 30% и выше) [10-13].

В дальнейшем руководством Удачинского ГОКа было принято решение модернизировать насосы в компании ООО «Линк-Продукт» (в период с 2014 по 2016 гг.). В рамках модернизации в конструкцию насосов был внесен следующий ряд изменений: были упрочнены пояски рабочих колес; дорогостоящие торцевые уплотнения были заменены на более дешевые сальниковые уплотнения; дорогостоящие подшипники скольжения заменены на более дешевые подшипники качения [3]. Также с компанией было заключено несколько контрактов на поставку и монтаж однопоточных секционных насосов модели НЦС(К) 350-1100.

Согласно условиям заключенных контрактов насосное оборудование должно было удовлетворять следующим требованиям руководства Удачинского ГОКа: средний ресурс до очередного

капитального ремонта – 2000 часов; средняя наработка на отказ – 800 часов.

После модернизации ресурс до очередного капитального ремонта насосов модели JSH 200 несколько лет составлял 2000...2500 ч (до 2018 г.). Затем он снизился до 1600...1800 ч. Насосам модели НЦС(К) 350-1100 характерна аналогичная картина.

Фактическая средняя наработка на отказ вышеуказанных насосов оказалась заметно ниже гарантийной и составила 310 ч. Частые выходы в текущие ремонты вновь были обусловлены преждевременным достижением предельного износа деталей узла гидравлической пяты, о чем свидетельствуют данные по распределению отказов (рис. 2).

Кроме интенсивного изнашивания, снижению долговечности узла гидравлической пяты стал способствовать еще один неблагоприятный фактор. На ГОКах АК «АЛРОСА» из-за высокой стоимости оригинальных (заводских) гидравлических пят (до 700 тыс. руб. за комплект) активно практикуется восстановление изношенных деталей, а затем их повторное использование и (или) переход на неоригинальные запчасти, которые изготавливаются непосредственно силами ремонтного цеха ГОКа [8].

Несмотря на тот факт, что затраты на восстановление оригинальных деталей гидравлических

пят, а также их изготовление собственными силами существенно ниже затрат на приобретение заводских запчастей (в 2...3 раза), в конечном итоге данные технические решения не совсем благоприятно отражаются в дальнейшем на надежности насосного оборудования.

Это объясняется следующим. Восстановленные и неоригинальные детали обычно имеют некоторую неровность, что в процессе работы насоса ведет к неравномерному распределению осевой силы и соответственно с этим к их более интенсивному износу в зоне локального контакта.

У рассматриваемого насосного оборудования ресурс подшипников качения обычно составляет 800...900 ч. В ходе наблюдений было установлено, что основной причиной выхода из строя рассматриваемых деталей является попадание в них шахтной воды. Рассолы, попадающие в подшипник, практически полностью растворяют масляную пленку, активизируя тем самым трибоконтакт между его сегментами [8]. Попадание шахтной воды в корпус подшипника вызвано ее утечками через кольцевой зазор уплотнения секционного насоса.

Величину утечек q через кольцевой зазор высотой h уплотнения секционного насоса можно найти следующим образом [14]:

$$q = \frac{4 \pi \cdot P \cdot h^3}{3 \eta \cdot \ln \cdot \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость шахтной воды; P – давление шахтной воды на уплотнение; r_2 , r_1 – соответственно, внешний и внутренний радиусы уплотнения.

Как видно из формулы (1), размер утечек q во многом зависит от параметров η и P . Известно, что динамическая вязкость жидкости η изменяется в зависимости от ее температуры. В свою очередь, значение параметра P напрямую зависит от развиваемого насосом напора H . В связи с тем, что температура шахтных вод не сильно меняется с течением времени ($-2...+7$ °C), то в качестве основного фактора, способствующего ее попаданию в подшипниковые узлы, необходимо рассматривать развиваемый насосом напор. Данная гипотеза подтверждается результатами регрессионной статистики (рис. 3), где в качестве обработанного материала были взяты средние наработки на отказ подшипников качения секционных насосов систем водоотлива подземных кимберлитовых рудников «Удачный» и «Мир».

Насосы модели GP-200.

В конце 2019 г. на рудник был поставлен двухпоточный секционный насос модели GP-200. Указанный насос проработал 2 недели, после чего был отправлен в свой первый капитальный ремонт по причине трещины в крышке всасывания, образовавшейся в результате чрезмерной затяжки одной из стяжных шпилек (рис. 8 б).

Ресурс до второго капитального ремонта данного насоса составил 1699 ч, что в ряде случаев ниже, чем у секционных насосов, оснащенных гидравлической пятой. Преимущество насосов модели

НЦС(К) 350-1100 перед насосом модели GP-200 в плане вышерассмотренного показателя долговечности объясняется более щадящими физико-механическими характеристиками перекачиваемой шахтной воды во время их ввода в эксплуатацию. При этом на момент вывода в капитальный ремонт снижение его начальной производительности не превышало 15 %, что является положительным моментом [15].

В настоящее время при наработке 1750 ч после второго капитального ремонта производительность уже упала с 460 до 250 м³/ч по причине интенсивного изнашивания роторных втулок.

Согласно результатам выполненных расчетов, представленных в виде гистограммы (рис. 4), видно, что значения коэффициента готовности у используемых в настоящее время на руднике моделей секционных насосов немало отличаются друг от друга. Объяснением этому служат практически одинаковые значения межремонтного ресурса и продолжительности нахождения в капитальных ремонтах (до 45 дней).

Выводы

1. Основными конструкционными элементами однопоточного секционного насоса, определяющими его уровень надежности, являются шеевые уплотнения рабочих колес и узел гидравлической пяты, в случае с двухпоточным – роторные втулки.
2. Ресурс подшипниковых узлов однопоточного секционного насоса связан с развиваемым им напором линейной зависимостью $y = 1,1131x + 1929,5$.
3. Значения коэффициента готовности одно- и двухпоточных секционных насосов мало отличаются друг от друга (0,72...0,76) при работе на загрязненной и химически активной шахтной воде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимохин В. Ю., Паламарчук Н. В. Результаты исследований осевой силы ротора и параметров автоматических уравнивающих устройств центробежных секционных насосов // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2017. № 45. С. 32-42.
2. Pavlenko I., Gusak O., Trojanowska Ju., Ivanov V. Estimation of the Reliability of Automatic Axial-balancing Devices for Multistage Centrifugal Pumps // Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering. 2018. V. 63(1). P. 52-56.
3. Kalinichenko P., Gusak O., Khovansky S., Krutas Yu. Substantiation and development of the procedure for calculating a hydraulic balancing device under condition of minimal energy losses // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 2(7). P. 36-41.
4. Долганов А. В., Ислентьев А. О., Чураков Е. О., Торопов Э. Ю. Анализ эффективности разгрузочных устройств шахтных центробежных секционных насосов // Известия Уральского государственного горного университета. 2014. № 2(34). С. 31-35.
5. Стюфляев С. С., Шипулин О. Г. Сравнительный анализ многоступенчатого насоса типа ЦНС с оппозиционным расположением рабочих колес и гидропята // Молодой ученый. 2017. № 3(137). С. 165-171.
6. Тимухин С. А., Долганов А. В., Ислентьев А. О., Чураков Е. О., Торопов Э. Ю., Попов Ю. В. О разработке шахтных центробежных секционных двухпоточных

насосов // Известия Уральского государственного горного университета. 2014. № 2(34). С. 41-44.

7. Овчинников Н. П. Опыт эксплуатации секционных насосов главного водоотлива подземного рудника «Удачный» // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 3. С. 154-161.

8. Овчинников Н. П., Смыслов А. Г. Некоторые проблемы эксплуатации насосов главного водоотлива подземного рудника «Удачный» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. Специальный выпуск 24. Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр Севера. С. 83-92.

9. Паламарчук Н. В., Тимохина В. Ю., Паламарчук Т. Н. Причины неудовлетворительной работы автоматических уравнивающих устройств центробежных высоконапорных насосов // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2016. № 42. С. 65-71.

10. Островский В. Г., Пещеренко С. Н. Расчет скорости гидроабразивного износа межступенчатых уплотнений нефтяного насоса // Вестник Пермского национально-исследовательского политехнического института. Геология. Нефтегазовое дело. 2012. № 5. С. 70-75.

11. Долганов А. В. Повышение энергоэффективности при эксплуатации комплексов шахтного водоотлива // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 5 (специальный выпуск 9). С. 16-23.

12. Shishlyannikov D., Zverev V., Ivanchenko A., Zvonarev I. Increasing the Time between Failures of Electric Submersible Pumps for Oil Production with High Content of Mechanical Impurities // Applied Sciences. 2022. Vol. 12(1):64 DOI:10.3390/app12010064

13. Shen Z., Li R., Han W., Quan H. Erosion wear in impeller of double-suction centrifugal pump due to sediment flow. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2020. Vol. 13(4). P. 131-142.

14. Тихомиров В. П., Измеров М. А. Протекание через торцевое уплотнение с учетом волнистости и шероховатости // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 4(52). С. 83-93.

15. Бражник О. И., Руденко А. А. Результаты опытно-промышленных испытаний секционного насоса GP-200/11x500-m // Горная промышленность. 2020. № 6. С. 53-55.

© 2022 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Овчинников Николай Петрович, кандидат техн. наук, доцент, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова (677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58), ovchinnlar1986@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Овчинников Н. П. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-23-28

Nikolai P. Ovchinnikov

M.K. Ammosov, North-Eastern Federal University

E-mail: ovchinnlar1986@mail.ru

ANALYSIS OF THE RELIABILITY LEVEL OF SECTIONAL PUMPS OF THE MAIN DRAINAGE SYSTEM OF THE UDACHNY UNDERGROUND MINE



Article info

Received:

05 May 2022

Accepted for publication:

01 October 2022

Accepted:

04 October 2022

Abstract.

Drainage is one of the most responsible technological processes in the extraction of minerals by underground method. In underground mines of the Russian Federation, the most common type of centrifugal pumps in the main and district drainage systems is a single-flow sectional pump. Currently, many pumping equipment-manufacturing plants are actively promoting two-flow sectional pumps to domestic mining enterprises. The purpose of this article is to conduct a comparative analysis of the reliability level of single- and double-flow sectional pumps, using the example of the main drainage installation of the underground kimberlite mine "Udachny". It is established that the main structural elements of a single-flow sectional pump determining its level of reliability are slot seals of impellers and a hydraulic balancing unit, and in the case of a two-flow one - rotor bush-

Keywords: single-flow pump, double-flow pump, mine, hydraulic balancing unit, bearing, availability factor.

ings. The close connection between the bearings is proved. It is established that the values of the availability coefficient of single- and double-flow sectional pumps differ little from each other when working on contaminated and chemically active mine water.

For citation: Nickolay P.O. Analysis of the reliability level of sectional pumps of the main drainage system of the Udachny underground mine. Mining Equipment and Electromechanics, 2022; 5(163):23-28 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-23-28

REFERENCES

1. Timohin J.W., Palamarchuk T.N. The research results of the axial forces of the rotor and automatic settings. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zhelezнодорожного транспорта*. 2017; 45: 32-42.
2. Pavlenko I., Gusak O., Trojanowska Ju., Ivanov V. Estimation of the Reliability of Automatic Axial-balancing Devices for Multistage Centrifugal Pumps. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*. 2018; 63(1): 52-56.
3. Kalinichenko P., Gusak O., Khovanskyy S., Krutas Yu. Substantiation and development of the procedure for calculating a hydraulic balancing device under condition of minimal energy losses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017; 2(7): 36-41.
4. Dolganov A.V., Islentyev A.O., Toropov E.Y., Churakov E.O. Analysis of effectiveness of dumping devices of mine centrifugal sectional pumps. *Bulletin Ural State Mining University*. 2014; 2(34): 31-35.
5. Styuflyayev S.S., Shipulin O.G. Comparative analysis of a multistage pump of the SCP type with an opposed arrangement of impellers and a balancing ring. *Molodoi uchenyi*. 2017; 3(137): 165-171.
6. Timuknin S.A., Dolganov A.V., Islentyev A.O., Churakov E.O., Toropov E.Yu., Popov Yu.V. On development of mine sectional centrifugal dual-streams pumps. *Bulletin Ural State Mining University*. 2014; 2(34): 41-44.
7. Ovchinnikov N.P. Experience of operation of sectional pumps main drainage of the underground mine «Ydachy». *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017; 53: 119-126.
8. Ovchinnikov N.P., Smyslov A.G. Some problems of operation of the main drainage of underground mine

«Udachny» pumps. *Mining informational and analytical bulletin. Special issue. Geomechanical and geotechnological problems of development of mineral resources of the North*. 2017; 24: 83-92.

9. Palamarchuk N.V., Timokhina V.J., Palamarchuk T.N. Causes of unsatisfactory operation of the automatic balancing de-vices of centrifugal high pressure pumps. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zhelezнодорожного транспорта*. 2016; 42: 65-71.

10. Ostrovskij V.G., Pesherenko S.G. Calculations of rate hydroabrasive wear interstage seal oil pump. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas business*. 2010; 5: 70-75.

11. Dolganov A.V. Energy efficiency improvement during operation of mine waterlets. *Mining informational and analytical bulletin*. 2019; S9: 16-23.

12. Shishlyannikov, D., Zverev, V., Ivanchenko, A., Zvonarev, I. Increasing the Time between Failures of Electric Submersible Pumps for Oil Production with High Content of Mechanical Impurities. *Applied Sciences*. 2022; 12(1): 64 DOI:10.3390/app12010064

13. Shen Z., Li R., Han W., Quan H. Erosion wear in impeller of double-suction centrifugal pump due to sediment flow. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2020;13(4): 131-1142.

14. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A. Leakage through face seal taking into account corrugation ad roughness. *Bryansk State Technical University*. 2016; 4(52): 83-93.

15. Brazhnik O.I., Rudenko A.A. Pilot test results of GP-200/11x500-M stage chamber pump. *Gornaya promyshlennost*. 2020; 6: 53-55.

© 2022 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

Nikolai P. Ovchinnikov, M.K. Ammosov, North-Eastern Federal University, (677000, Russia, Yakutsk, Belinskij. Street 58, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, ovchinnlar1986@mail.ru

Contribution of the authors:

Nikolai P. Ovchinnikov - research problem statement; conceptualisation of research; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions, scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text; data collection; data analysis; drawing the conclusions.

Author have read and approved the final manuscript.

