УДК 621.512

# ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ УСТАНОВКИ ВОЗДУХОРАЗДЕЛЕНИЯ

# IMPROVING THE RELIABILITY OF COMPRESSOR EQUIPMENT FOR AIR SEPARATION UNITS

У.Э. Аллаяров, Р.Р. Макулов, Н.Х. Абдрахманов, В.В. Шабанова

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Ural E. Allaiarov, Ruslan R. Makulov, Nail KH. Abdrakhmanov, Vilena V. Shabanova

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

e-mail: ural-ufa@mail.ru

Аннотация. В статье исследован поршневой компрессор. Затронута проблема надежности и безаварийной, безопасной работы компрессорного оборудования. Способ повышения надежности, снижения аварийности путем замены впускных и нагнетательных клапанов. Целью работы являлось исследование статистических эксплуатационных параметров поршневых компрессоров для получения их характеристик надежности. Аналитической базой являлись эксплуатационные данные поршневых компрессоров воздухоразделения одного из нефтеперерабатывающих заводов России. На основе этого проведён анализ их физического износа и получены вероятности безотказной работы и интенсивности отказов.

Проанализирована динамика аварийности и травматизма при эксплуатации оборудования под избыточным давлением. Обнаружили, что по данным Ростехнадзора за 2012-2017 год произошло 19 аварий и 15 несчастных случаев со смертельным исходом. Например, неудовлетворительное качество



проведения монтажных и ремонтных работ на оборудовании, работающем под избыточным давлением, приводящее к нарушению технологий монтажа и ремонта оборудования и, как следствие, к его разрушению по причине наличия дефектов, допущенных при монтаже и (или) ремонте; низкое качество проведения технического освидетельствования, технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности оборудования, в том числе выполнение данных работ без проведения визуального осмотра и оценки фактического состояния. В связи с этим, остается актуальный вопрос о безопасной, безаварийной эксплуатаций компрессорного оборудования на нефтеперерабатывающих заводах России.

Для снижения энергоемкости технологических процессов в настоящее время разрабатываются и реализуются энергосберегающие мероприятия, направленные на повышение надежности и энергоэффективности работы оборудования. На объектах топливно-энергетического комплекса применяется различное оборудование, одним из основных, применяемых во многих производствах, являются компрессоры для компримирования газов.

Ведение мониторинга с анализом основных параметров работы поршневого компрессора и показателей работы в заводских параметрах может быть принято как основание для досрочного проведения ремонта, в то же время удовлетворительные значения параметров могут служить основанием для увеличения межремонтного периода.

Полученные в работе зависимости показателей надёжности могут использоваться для планирования времени проведения ремонтов поршневых агрегатов из условия минимизации затрат.

**Abstract.** The article examines the piston compressor. The problem of reliability and trouble-free, safe operation of compressor equipment is touched upon. A method for improving reliability, reducing accidents by replacing intake and discharge valves. The aim of the work was to study the statistical operational parameters of reciprocating compressors to obtain their reliability characteristics. The analytical base was the operational data of reciprocating air separation



compressors of one of the Russian oil refineries. Based on this, an analysis of their physical wear and tear was carried out and the probability of failure-free operation and failure rate were obtained.

The dynamics of accidents and injuries during the operation of equipment under excessive pressure is analyzed. We found that according to Rostekhnadzor data for 2012-2017, there were 19 accidents and 15 fatal accidents. For example: unsatisfactory quality of installation and repair work on equipment operating under excessive pressure, leading to a violation of the technology of installation and repair of equipment and, as a result, to its destruction due to the presence of defects made during installation and (or) repair; poor quality of technical inspection, technical diagnostics and industrial safety expertise of equipment, including the performance of these works without visual inspection and assessment of the actual condition. In this regard, the issue of safe, trouble-free operation of compressor equipment at oil refineries in Russia remains relevant.

To reduce the energy intensity of technological processes, energy-saving measures are currently being developed and implemented to improve the reliability and energy efficiency of equipment operation. At the facilities of the fuel and energy complex, various equipment is used, one of the main ones used in many industries is compressors for compressing gases.

Monitoring with an analysis of the main parameters of the piston compressor operation and performance indicators in the factory parameters can be taken as a basis for early repair, at the same time, satisfactory values of the parameters can serve as a basis for increasing the inter-repair period. The dependences of reliability indicators obtained in this work can be used to plan the time of repairs of piston units from the condition of minimizing costs.

**Ключевые слова:** поршневой компрессор; клапаны; повышение надежности; безотказная работа; авария; показание работы в заводских параметрах; установка воздухоразделения

**Key words:** piston compressor; valves; improved reliability; trouble-free operation; energy efficiency; accidents, installation of air separation



Сегодня трудно представить промышленный технологический процесс без компрессоров. Компрессор — это промышленный агрегат, который используют для сжатия и подачи различных газов и воздуха под давлением.

Компрессоры различаются по давлению, по производительности, по рабочей среде (сжимаемому веществу). Компрессоры широко используются в различных технологических процессах практически во всех отраслях производства. Основной задачей компрессора является сжатие воздуха. Сжатый воздух от компрессора может быть использован как источник энергии для исполнительных механизмов, так и для проведения каких-либо технологических работ, связанных с применением сжатого воздуха [1].

Компрессоры классифицируются по ряду характерных признаков.

По назначению компрессоры делятся:

- по отраслям техники или производства, для которых они предназначены (химические, энергетические, общего назначения и т.д.);
- по роду сжимаемого газа (воздушный, кислородный, хлорный, азотный и т.д.);
- по непосредственному назначению (пускового воздуха, гаражные, тормозные и т.д.).

По производительности каждый тип компрессоров имеет свою классификацию. Например, поршневые компрессоры подразделяется:

- микропроцессоры производительность до 10 дм<sup>3</sup>/с;
- малой производительности от 10 до 100 дм $^{3}/c$ ;
- средней от 100 до 1000 дм<sup>3</sup>/с;
- большой свыше 1000 дм<sup>3</sup>/с [2].

Гарантией эффективной и безопасной работы любого оборудования является его качественное и своевременное обслуживание и ремонт. Периодичность ремонта определяется принятым межремонтным циклом (планово – предупредительный характер проведения ремонтов), либо возникновением неисправностей элементов (проведение ремонтов по фактическому состоянию). Для обеспечения безаварийной, безопасной



работы оборудования компрессорной установки после разборки компрессора производят дефекацию узлов и отдельных деталей трубопроводов, определяют их состояние [3, 4].

Ведение мониторинга с анализом основных параметров работы поршневого компрессора и показателей работы в заводских параметрах может быть принято как основание для досрочного проведения ремонта, в то же время удовлетворительные значения параметров могут служить основанием для увеличения межремонтного периода. Увеличение межремонтного периода предлагается в первую очередь для клапанов с наилучшими показателями вероятности безотказной работы [5].

В поршневом воздушном компрессоре клапаны являются одной из наиболее важных частей регулирования и подачи сжатого воздуха (рисунок 1). Когда клапан находится в оптимальном рабочем состоянии, сжатый воздух распределяется равномерно и эффективно. Однако если клапан выходит из строя, система сжатого воздуха перестает эффективно работать и может привести к аварии [1].

Отказ клапана поршневого компрессора кроется в проблемах, которые возникают из-за негативного воздействия компримируемой среды. Если воздушный компрессор находится в постоянном контакте с грязью и с масляным туманом, клапаны и другие компоненты в какой-то момент времени могут быть повреждены, особенно если не предпринимаются какие-либо меры по устранению неисправности [6].

На рисунке 1 показан прямоточный клапан, выполненный с пружинящимися пластинами, которые имеют форму прямоугольных полос. В свободном состоянии они прилегают к седлу, а под давлением газа выгибаются по дуге углублений, выполненных в ограничителе подъема. Концы самопружинящихся пластин находятся в направляющих гнездах, для предохранения от продольного сдвига служат шпонки или планки. Высоту подъёма в средней части пластины по соображениям долговечности



приходится выбирать небольшой, поэтому необходимо выбирать пластины малой ширины, но увеличивая их число при этом [7].

Прямоточные клапаны состоят из седла 1 и примыкающих к ним упругих пластин 2 (рисунок 2). Когда давление под клапаном больше, чем над ним, пластины отгибаются (рисунок 2,  $\delta$ ), пропуская поток сжимаемого вещества. Клапаны такого типа имеют очень малое сопротивление, однако сложны в производстве и металлоемки.

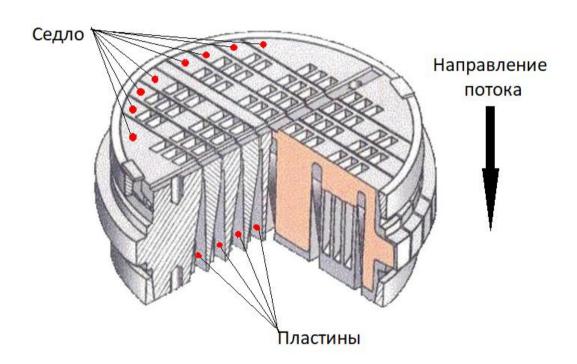
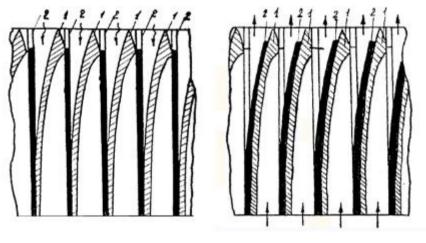


Рисунок 1. Прямоточный клапан



а) закрытое положение;

б) открытое положение

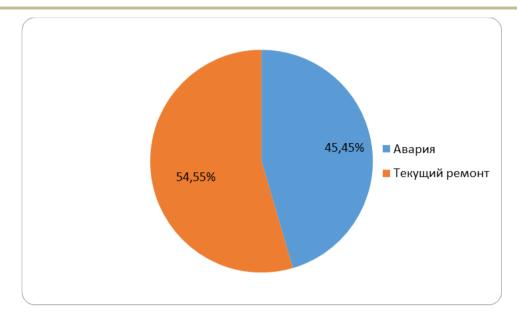
Рисунок 2. Положения прямоточного клапана



Благодаря прямому току газа, рациональной форме проточного клапана, увеличенному проходному сечению, эквивалентная площадь прямоточного клапана в 2,0-2,5 раза больше, что даёт 4-x-6-тикратное снижение потерь энергии. Помимо уменьшения потерь энергии прямоточные клапаны увеличивают производительность компрессоров. Этому способствует большая плотность каналов, малая потеря давления к концу всасывания, меньший нагрев газа, меньший мертвый объем. Прямоточные клапаны действуют, практически, совершенно бесшумно. Вследствие малой массы и большой площади пластин они быстро открываются. Прямоточные клапаны выполняются различных диаметров до 320 мм на перепад давления до 4 МПа и применяются при любых частотах вращения. Седла и пластины клапанов изготавливаются индивидуально, после сборки клапаны не нуждаются в окончательной механической обработке. Все это упрощает сборку новых клапанов и замену изношенных деталей при ремонтах. Один и тот же клапан может служить в качестве всасывающего и нагнетательного. Глубина гнезда в цилиндре под всасывающие и нагнетательные клапаны службы одинакова. Срок клапанов уменьшается при увеличении запылённости газов [8].

В работе клапана могут быть следующие неисправности: клапанные пластины не обеспечивают достаточной плотности; поломка деталей клапана (пластин, пружины, седла, направляющей шпильки); ослабление пружины или потери упругости; несвоевременное закрытие клапанов. В каждом отдельном случае, прежде всего, определяют причины нестабильной работы клапанов, а затем устраняют обнаруженные дефекты [9].

В рамках исследования проанализирована работа поршневого компрессорного оборудования на установке воздухоразделения. За 2019 г. было проведено 6 текущих ремонтов и произошло 5 аварийных остановок по причине выхода из строя клапанов (рисунок 3).



**Рисунок 3.** Диаграмма исследуемых причин остановки компрессора воздухоразделения за 2019 г.

Замена клапанов по внутреннему регламенту предприятия занимает не более 8 ч. Из этого следует, что установка воздухоразделения была неисправна 88 ч. После проведения ремонтных работ установка воздухоразделения выходит на требуемый технологический регламентом режим работы в течение следующих 8 ч. Можно сделать вывод, что за 2019 г. установка воздухоразделения по причине неисправности клапанов не производила качественную продукцию в течение 176 ч.

Произведен приблизительный расчет стоимостных потерь продукций за время простоя. Цена азота особой чистоты в среднем на Российском рынке за м<sup>3</sup> составляет 138 руб. Установка производит 640 м<sup>3</sup>/ч. Таким образом, проведенный расчет показал, что за время проведения ремонтных работ и за время возращения установки в требуемый технологический режим работы не удалось произвести 112640 м<sup>3</sup> азота особой чистоты, что эквивалентно 15544320 руб.

Средний ресурс работы клапанов традиционного исполнения по данным производства составляет 3500 ч. Нами рассмотрены режимы работы беспружинных клапанов с грибковыми запорными элементами (рисунок 4). Использование исследуемой модели клапанов позволяет эксплуатировать



поршневые компрессоры в более сложных, загрязненных условиях компримирования газов. Основной особенностью клапанов данного типа является замена пружин на два постоянных магнита, что позволяет значительно увеличить срок безотказной эксплуатаций клапана. Средний ресурс работы клапана по данным производителя составляет до 25000 ч за счет замены пружины двумя цилиндрическими магнитами ИЗ редкоземельных металлов, имеющих огромный ресурс при высоких Магниты в полимерных толкателях температурах до 300 °C [10]. расположены В ограничителях подъема, одноименными полюсами навстречу друг к другу. Ограничитель подъема изготавливается из двух деталей – корпуса и подпятника. Это обеспечивает простоту сборки и достаточно просторную полость между магнитными парами, сообщенную с проходными каналами ограничителя подъема, исключая загрязнение клапана.



Рисунок 4. Беспружинный клапан с грибковым запорным элементом



При моделировании рабочих процессов обычно принимают допущение о постоянстве давления в полостях ступени, граничащих с цилиндром, что соответствует объёмам полостей всасывания и нагнетания

$$(V_{\text{\tiny \Pi.BC}}, V_{\text{\tiny \Pi.H\Gamma}}) \rightarrow \infty.$$

В реальных конструкциях объёмы полостей конечны и подчиняются зависимости  $V_n = \psi \cdot V_h$ , где  $\psi = 0.5, ..., 2, 0$ .

В этом случае, в силу периодичности процессов рабочего цикла в полостях всасывания и нагнетания возникают пульсации давления, амплитуда и частота которых зависит от величины  $\psi = V_n/V_h$ , диаметра патрубков d, свойств рабочего вещества, частоты вращения вала и давлений на входе и выходе ступени.

**Таблица 1.** Параметры поршневого компрессора воздухоразделения при комплектации клапанами различного типа

Тип клапанов	-	Беспружинный клапан с грибковым запорным элементом	Традиционный клапан
$T_{ m H\Gamma}$	К	413.7	428.3 + 14 K
m <sub>1.A</sub>	кг/ч	542.2	519.9
V <sub>H.y.1A</sub>	$\frac{3}{MMH}$	7.499	<b>7.191</b> <sub>-4.3%</sub>
V <sub>Bc.1A</sub>	${\rm M}^3/{\rm MWH}$	1.897	1.819
N <sub>инд.1A</sub>	кВт	18.568	19.961
$\sum \Delta N_{_{\rm KJI}}$		1.392	2.957 <sub>↑ в 2 раза</sub>
$\chi_{_{\mathrm{BC}}}$		0.044	0.103
$\chi_{_{\mathrm{H}\Gamma}}$	-	0.037	0.082
$\eta_{_{^{_{\scriptscriptstyle{\mathrm{U}3.\mathrm{UHJ}}}}}}$		0.748	0.667_8%

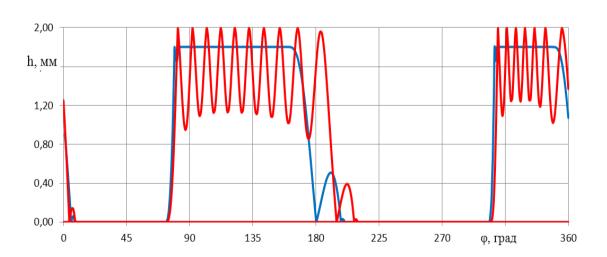
Результаты исследования, приведенные в таблице 1 в виде текущих и интегральных параметров поршневого компрессора воздухоразделения, укомплектованного клапанами различного типа, позволяют сделать следующие выводы.



Традиционные клапаны проигрывают беспружинным клапанам с грибковыми запорными элементами по основным показателям, включая:

- снижение производительности на 4.3 %;
- снижение изотермного индикаторного КПД  $\eta_{\text{из.инд}}$  на 8.0 %;
- повышение температуры нагнетаемого газа на 14 К.

В работе поршневого компрессора происходит процесс пульсаций давлений, что приводит к повышению частоты и амплитуды колебаний клапанных пластин в период всасывания и нагнетания. Это способствует к снижению производительности ступени, эффективности ее работы и преждевременному выходу их из строя [11]. На рисунке 5 представлен график частоты и амплитуды колебаний клапанных пластин традиционного клапана в сравнении с режимом работы беспружинного клапана с грибковым запорным элементом, из которого видно, что он отличается более стабильной и, соответственно, надежной работой.



----- Беспружинный клапан с грибковым запорным элементом ----- Традиционный клапан

Рисунок 5. График частоты и амплитуды колебаний клапанов



#### Выводы

Обосновано, что при использовании беспружинных клапанов с грибковыми запорными элементами надежность компрессора повысится в 7 раз, периодичность текущего ремонта сократится до 1 раза в год, увеличится время бесперебойной работы установки воздухоразделения, что позволит снизить финансовые потери до 14 млн руб. в год.

Полученные в работе показатели надёжности от использования более современных и энергоэффективных конструкций клапанов дают возможность более качественного планирования времени проведения ремонтов поршневых агрегатов из условий минимизации затрат.

## Список используемых источников

- 1. Фотин Б.С., Пирумов И.Б., Прилуцкий И.К., Пластинин П.И. Поршневые компрессоры / Под ред. Б.С. Фотина. Л.: Машиностроение, 1987. 372 с.
- 2. Френкель М.И. Поршневые компрессоры. Л.: Машиностроение, 1969. 743 с.
- 3. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР КОМПАКС). М.: Машиностроение, 1999. 162 с.
- 4. Шайбаков Р.А., Абдрахманов Н.Х., Кузеев И.Р., Симарчук А.С., Рахимов Ф.Р. Расследование аварийных ситуаций: новые методы и подходы // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2008. Вып. 3 (73). С. 110-121.
- 5. Файрушин Ш.З., Байков И.Р., Китаев С.В. Определение показателей надежности поршневых компрессоров // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 2. С. 120-124.



- 6. Байков И.Р., Китаев С.В., Файрушин Ш.З. Диагностирование технического состояния поршневых компрессоров // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 3. С. 28-30.
- 7. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М.: Энергоатомиздат, 1984. 415 с.
- 8. Страхович К.И., Френкель М.И., Кондряков И.К., Рис В.Ф. Компрессорные машины. М.: Госторгиздат, 1961. 600 с.
- 9. Костюков В.Н., Науменко А.П. Решения проблем безопасной эксплуатации поршневых машин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 3. С. 27-36.
- 10. Официальный сайт Научно-производственной компании «КСК-Сервис». URL: https://www.klapan-ksk.com/ (дата обращения: 08.08.2021).
- 11. Кузнецов Л.Г., Иванов Д.Н., Молодова Ю.И., Берлин Е.А., Прилуцкий А.А. Оценка герметичности компрессорных ступеней с учетом износа уплотнений поршней при эксплуатации // Холодильная техника. 2004. № 3. С. 28-31.

#### References

- 1. Fotin B.S., Pirumov I.B., Prilutskii I.K., Plastinin P.I. *Porshnevye kompressory* [Reciprocating Compressors]. Ed. by B.S. Fotina. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 372 p. [in Russian].
- 2. Frenkel M.I. *Porshnevye kompressory* [Reciprocating Compressors]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1969. 743 p. [in Russian].
- 3. Kostyukov V.N., Boichenko S.N., Kostyukov A.V. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya bezopasnoi resursosberegayushchei ekspluatatsiei oborudovaniya neftepererabatyvayushchikh i neftekhimicheskikh proizvodstv (ASU BER KOMPAKS) [Automated Control Systems for safe Resource-Saving Operation of Equipment for Oil Refining and Petrochemical Industries (ASU BER KOMPAKS)]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999. 162 p. [in Russian].



- 4. Shaibakov R.A., Abdrakhmanov N.Kh., Kuzeev I.R., Simarchuk A.S., Rakhimov F.R. Rassledovanie avariinykh situatsii: novye metody i podkhody [Investigations of Emergency Situations: New Methods and Approaches]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2008, Issue 3 (73), pp. 110-121. [in Russian].
- 5. Fairushin Sh.Z., Baikov I.R., Kitaev S.V. Opredelenie pokazatelei nadezhnosti porshnevykh kompressorov [Determining Reliability Indices of Piston Compressors]. *Neftegazovoe delo Petroleum Engineering*, 2016, Vol. 14, No. 2, pp. 120-124. [in Russian].
- 6. Baikov I.R., Kitaev S.V., Fairushin Sh.Z. Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevykh kompressorov [Diagnostics of Reciprocating Compressors' Technical Conditions]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie Energy Safety and Energy Economy*, 2015, No. 3, pp. 28-30. [in Russian].
- 7. Cherkasskii V.M. *Nasosy, ventilyatory, kompressory* [Pumps, Fans, Compressors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 415 p. [in Russian].
- 8. Strakhovich K.I., Frenkel M.I., Kondryakov I.K., Ris V.F. *Kompressornye mashiny* [Compressor Machines]. Moscow, Gostorgizdat Publ., 1961. 600 p. [in Russian].
- 9. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. Resheniya problem bezopasnoi ekspluatatsii porshnevykh mashin [Solutions to the Problems of Safe Operation of Piston Machines]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Making*, 2009, No. 3, pp. 27-36. [in Russian].
- 10. Official Website of Research and Production Company «KSK-Servis». Available at: https://www.klapan-ksk.com/ (accessed 08.08.2021). [in Russian].
- 11. Kuznetsov L.G., Ivanov D.N., Molodova Yu.I., Berlin E.A., Prilutskii A.A. Otsenka germetichnosti kompressornykh stupenei s uchetom iznosa uplotnenii porshnei pri ekspluatatsii [Assessment of the Tightness of the Compressor Stages Taking into Account the Wear of the Piston Seals During Operation]. *Kholodil'naya tekhnika Kholodilnaya Tekhnika*, 2004, No. 3, pp. 28-31. [in Russian].



## Сведения об авторах

#### About the authors

Аллаяров Урал Эдгарович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Ural E. Allajarov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Industrial Safety and Labor Protection Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ural-ufa@mail.ru

Макулов Руслан Рустемович, магистрант кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Ruslan R. Makulov, Undergraduate Student of Industrial Safety and Labor Protection Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ruslanmakuloff@yandex.ru

Абдрахманов Наиль Хадитович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная безопасность и охрана труда» УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Nail Kh. Abdrakhmanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of of Industrial Safety and Labor Protection Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: anailx@mail.ru

Шабанова Вилена Венеровна, магистрант кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Vilena V. Shabanova, Undergraduate Student of Industrial Safety and Labor Protection Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: vilena-shabanova@yandex.ru