

УДК 622.279.8

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ ПРИ ПОДГОТОВКЕ
СЫРОГО ГАЗА МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
СЕПАРАЦИИ**

**ENSURING WORK SAFETY DURING PREPARATION OF RAW GAS
USING LOW TEMPERATURE SEPARATION UNIT**

**Галлямов В. Р., Колчин А. В., Вадулина Н. В., Салимов А. О.,
Ворохобко В. В.**

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

**V. R. Gallyamov, A. V. Kolchin, N. V. Vadulina, A. O. Salimov,
V. V. Vorochobko**

**Ufa state petroleum technological university,
Ufa, Russian Federation**

Аннотация. Узел комплексной подготовки газа, в состав которого входят установки для реализации процесса низкотемпературной сепарации, характеризуется работой с высокими давлениями. Так, газ, поступающий с газового месторождения, может достигать значений давления 12 МПа, что, в случае аварии, создает опасность причинения вреда персоналу, обслуживающему данный узел. Таким образом, необходим расчет толщины стенок трубопроводов и газодинамического оборудования. К тому же, конденсация тяжелых компонентов газового потока сопровождается значительным выделением холода, что может стать причиной неблагоприятных воздействий на персонал, работающий с данным оборудованием. Сверхзвуковая сепарация предполагает расширение предварительно очищенной от механических примесей

скважинной продукции в сверхзвуковом профиле сопла, что сопровождается снижением температуры. При прохождении критического сечения сопла поток газа достигает скорости звука и далее в диффузоре охлаждается до требуемых температур. С точки зрения обеспечения безопасности рабочего персонала, данный способ реализации низкотемпературной сепарации позволяет избежать нежелательного негативного воздействия. Это объясняется тем, что данная технология не предполагает участие сотрудников предприятия во время осуществления технологических операций, как того требует, например, детандерная технология.

В работе рассматривается перспективная сверхзвуковая технология с точки зрения модернизации существующих установок комплексной подготовки газа низкотемпературной сепарацией, основанная на использовании изоэнтропийного расширения с последующим изоэнтропийным сжатием газового потока вместо классического изоэнтальпийного охлаждения. Для анализа сопла была реализована математическая модель сверхзвукового сопла. Численное моделирование играет важную роль в ускорении разработки данного метода, необходимого для оптимизации и повышения эффективности сепарации, а также снижения стоимости данного метода. Для обеспечения безаварийной эксплуатации рассматриваемой технологии был осуществлен расчет толщины стенки исходя из нагрузок, действующих на профиль, вызванных давлением среды внутри сопла, а так напряжений в металле от перепада температур.

Abstract. A host of complex gas, which is composed of an apparatus for implementing the process of low-temperature separation, is characterized by high pressures. So, gas coming from gas fields may reach values of pressure 12 MPa, which in the event of an accident, creates a risk of harm to the staff servicing this node. Thus, the necessary calculation of wall thickness of pipelines and gas equipment. Besides, the condensation of the heavy

components of the gas stream is accompanied by a significant release of cold, which can cause adverse effects on personnel working with this equipment. Supersonic separation involves the expansion of pre-cleaned from mechanical impurities downhole products in a supersonic nozzle profile, which is accompanied by temperature decrease. When passing the critical section of the nozzle the gas flow reaches the speed of sound and later in the diffuser is cooled to the desired temperature. From the point of view of ensuring safety of the working personnel, the implementation method of low-temperature separation allows to avoid unwanted negative effects. This is because this technology does not involve the participation of employees, during the implementation of technological operations, as required, for example, the expander technology.

The paper discusses promising from the point of view of modernization of existing installations of complex preparation of gas of low-temperature separation of a supersonic technology based on the use of isentropic expansion, followed by isentropic compression of the gas stream instead of the classic isoenthalpic cooling. For analysis of the nozzle was realized a mathematical model of the supersonic nozzle. Numerical simulation plays an important role in accelerating the development of the method necessary to optimize and improve the separation efficiency and reduce the cost of this method. To ensure trouble-free operation of the technology in question was used to calculate the thickness of the wall based on the loads acting on the profile, caused by the pressure of the medium inside the nozzle, and stresses in the metal from temperature changes.

Ключевые слова: сверхзвуковое течение; осушка газа; 3-S сепарация; сопло Лавалья; метод конечных элементов; изоэнтروпийный процесс.

Key words: supersonic Flow; Dehydration of Natural Gas; 3-S Separation; De Laval Nozzle; Finite Element Method; Isentropic Process.

Перед закачкой скважинной продукции газового или газоконденсатного месторождения в магистральный газопровод необходима его подготовка на установке комплексной подготовки газа (УКПГ). Помимо прочего, на УКПГ осуществляется очистка газа от механических примесей, воды и тяжелых углеводородов. Необходимость отделения капельной и растворенной влаги обусловлена возможностью возникновения гидратных пробок. В свою очередь, конденсация тяжелых углеводородов по длине магистрального газопровода может стать причиной частичного перекрытия проходного сечения. Но более важно то, что стоят тяжелые фракции много больше, чем сам газ, тем самым делая процесс извлечения углеводородов C_{3+} важным в экономическом плане [1, 2].

Основными характеристиками товарного газа, согласно нормам, изложенным в СТО Газпром 089-2010, являются температура точки росы по углеводородам ($TTR_{УВ}$) и по влаге ($TTR_{В}$). Эти параметры в большей степени зависят от концентрации в товарном газе гомологов метана и влаги, в растворенном или капельном виде, таким образом, что чем эта концентрация больше, тем $TTR_{УВ}$ и $TTR_{В}$ выше.

Для реализации отделения вышеназванных компонентов потока от сырого газа наибольшее распространение получил процесс низкотемпературной сепарации (НТС), суть которого заключается в охлаждение скважинной продукции до температур достаточных для конденсации целевых компонентов. В связи с тем, что эти температуры достаточно низкие (до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) в подготавливаемый и далее транспортируемый поток газа должен быть введен ингибитор гидратообразования (метанол).

Узел комплексной подготовки газа, в состав которого входят установки для реализации процесса низкотемпературной сепарации, характеризуется работой с высокими давлениями. Так, газ, поступающий с газового месторождения, может достигать значений давления 12 МПа, что, в случае

аварии, создает опасность причинения вреда персоналу, обслуживающему данный узел. Таким образом, необходим расчет толщины стенок трубопроводов и газодинамического оборудования, относящегося к УКПГ. К тому же, конденсация тяжелых компонентов газового потока сопровождается значительным выделением холода, что может стать причиной неблагоприятных воздействий на персонал, работающий с данным оборудованием.

Одним из способов реализации процесса НТС при отбензинивании газа является использование дроссельного клапана для охлаждения сырьевого потока газа при использовании избыточного давления. Несмотря на экономическую целесообразность и простоту эксплуатации, использование дросселя малоэффективно с точки зрения термодинамического процесса, что говорит о малой глубине извлечения тяжелых углеводородов [3, 4]. К тому же, дроссельный клапан имеет жесткие границы по входному давлению: коэффициент Джоуля-Томпсона составляет в среднем 3-5 °С/МПа. К тому же, на этапе падающей добычи, НТС с дроссельным клапаном требует ввода дополнительных единиц газодинамического оборудования в виде дожимной компрессорной станции перед дросселем для обеспечения требуемого перепада давления.

Сверхзвуковая сепарация реализует технологию НТС, используя процесс близкий к изоэнтروпийному. Данная технология предполагает изоэнтропийное расширение предварительно очищенной от механических примесей скважинной продукции в сверхзвуковом профиле сопла, что сопровождается снижением температуры. При прохождении критического сечения сопла поток газа достигает скорости звука и далее в диффузоре охлаждается до требуемых температур. С точки зрения обеспечения безопасности рабочего персонала, данный способ реализации низкотемпературной сепарации позволяет избежать нежелательного негативного воздействия. Это объясняется тем, что данная технология не предполагает участие сотрудников предприятия во время осуществления

технологических операций, как того требует, например, детандерная технология.

В данной работе с целью определения безопасных условий эксплуатации, а так же разработки ряда мер по предотвращению негативного воздействия технологических узлов установки сверхзвуковой сепарации на рабочий персонал была разработана методика определения геометрических параметров сопла и физических параметров потока, в основу которой были положены соотношения изоэнтропийного потока. Геометрия профиля суживающейся части сопла Лаваля, положенного в основу геометрии рассматриваемой технологии, определяется по уравнению Витошинского, а размеры расширяющейся части получаются из уравнения неразрывности [5, 6]. Для обеспечения безаварийной эксплуатации рассматриваемой технологии был осуществлен расчет толщины стенки исходя из нагрузок, действующих на профиль, вызванных давлением среды внутри сопла, а так напряжений в металле от перепада температур [7, 8].

В условиях рассматриваемой задачи для характеристики газового потока в начальном сечении сопла были взяты давление на входе, равное 8 МПа, и температура газа на входе, равная 15 °С. Для анализа характеристик потока газа был рассчитан такой его состав, который в приведенных выше условиях всегда бы пребывал в однофазном состоянии. Такой подход позволил нам не учитывать на этом этапе расчетов, воздействие от образовавшегося пристеночного слоя конденсата. Состав газа выглядит следующим образом (таблица 1).

Таблица 1. Концентрация компонентов анализируемого газа

Наименование компонента	Массовая концентрация, %
метан	0,8210
этан	0,1539
пропан	0,0251

Результатом данного расчета стала геометрия профиля сверхзвукового сопла (рисунок 1).

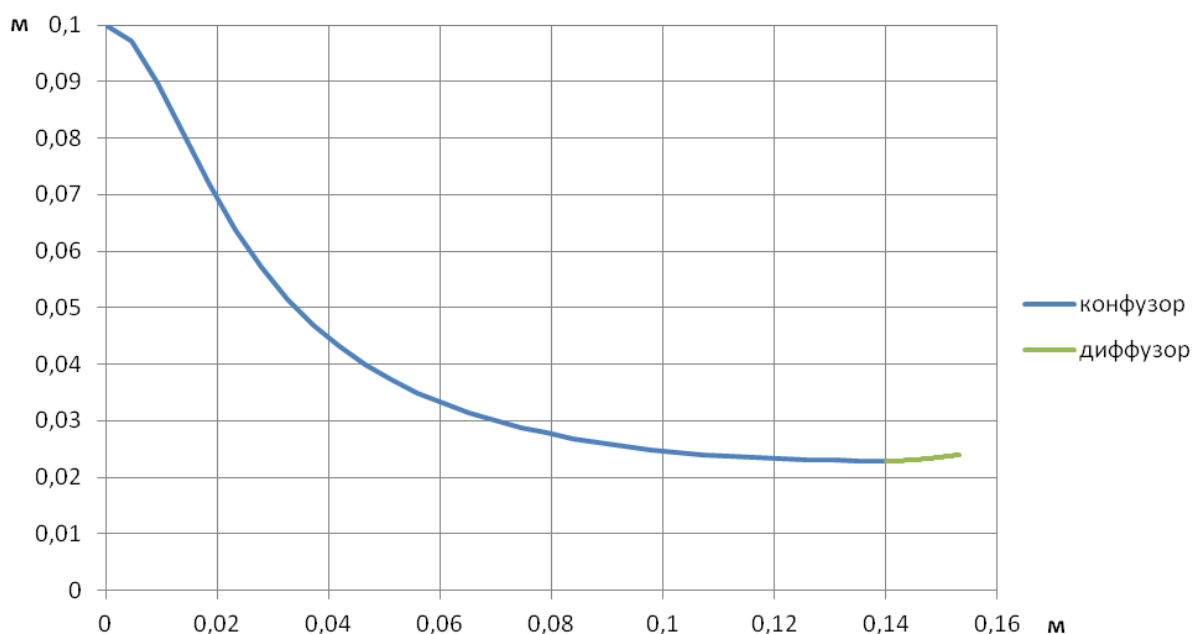


Рисунок 1. Геометрия сверхзвуковой части узла редуцирования

Используя данные о геометрии сверхзвукового сопла, была построена компьютерная модель в программной среде ANSISCFX. После чего было смоделировано течение газа с учетом следующих допущений:

- газ идеальный;
- нет потерь напора по длине;
- отсутствует теплообмен с окружающей средой;
- газовый поток попадает в сопло в однофазном режиме.

В результате, характеристики газа, полученные при помощи моделирования и аналитическим методом, для рассматриваемого профиля с соответствующими граничными условиями (то есть для 8 МПа и -15 °С) показали полное схождение с аналитическим расчетом.

Для оценки возможного негативного воздействия низких температур, приведем распределение температур газового потока по профилю сопла Лавала, полученных методом конечных элементов в программной среде ANSYSCFX [9 - 11] (рисунок 2).

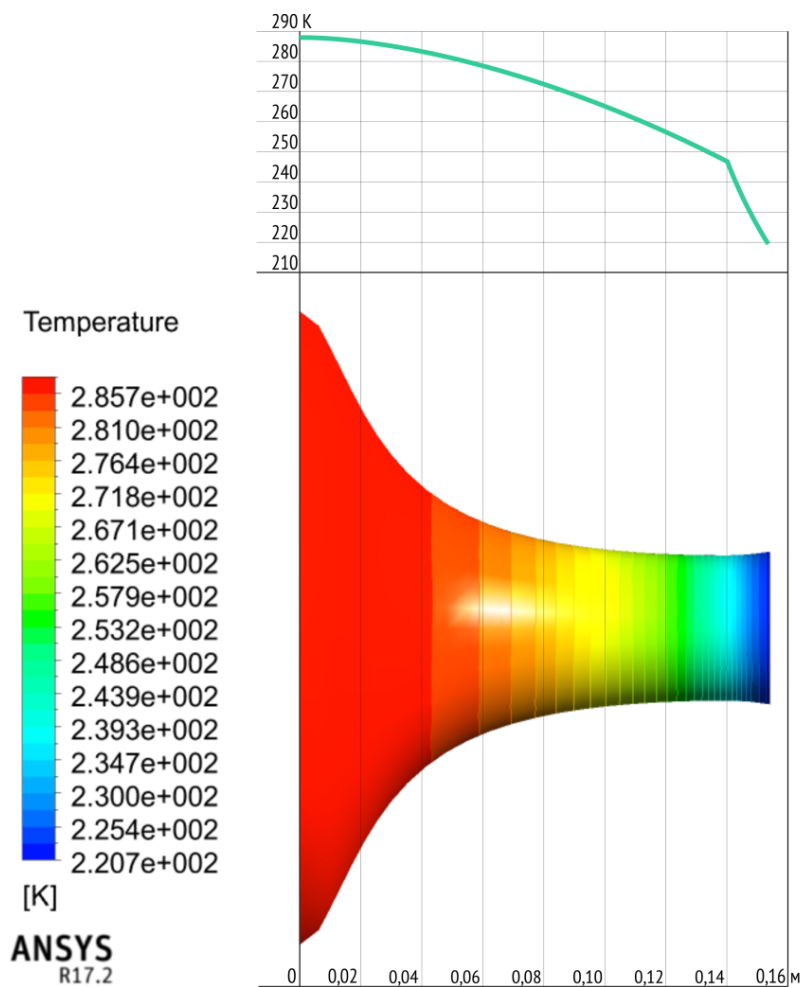


Рисунок 2. Распределение температур газового потока по профилю сопла Лавалья

Как видно из рисунка, эксплуатация установки сопряжена с работой с поверхностями с достаточно низкой температурой. Чтобы определить возможные последствия от контакта с рассматриваемой установкой, выведенной на проектную мощность, обратимся к нормативным документам [9,12].

Из данной функциональной зависимости ясно следует, что контакт незащищенной конечности при мгновенном контакте может вызвать боль, более длительный контакт приведет к нечувствительности, затем может последовать обморожение конечности. Из этого следует, что в целях предотвращения возможных негативных воздействий на человека при работе установки контакт с ней должен быть запрещен. Для обеспечения

исполнения данного требования необходимо предусмотреть защитное ограждение территории установки с соответствующими надписями [13,14]. Пусконаладочные работы производить только в том случае, когда газ по ней не идет, то есть установка не работает.

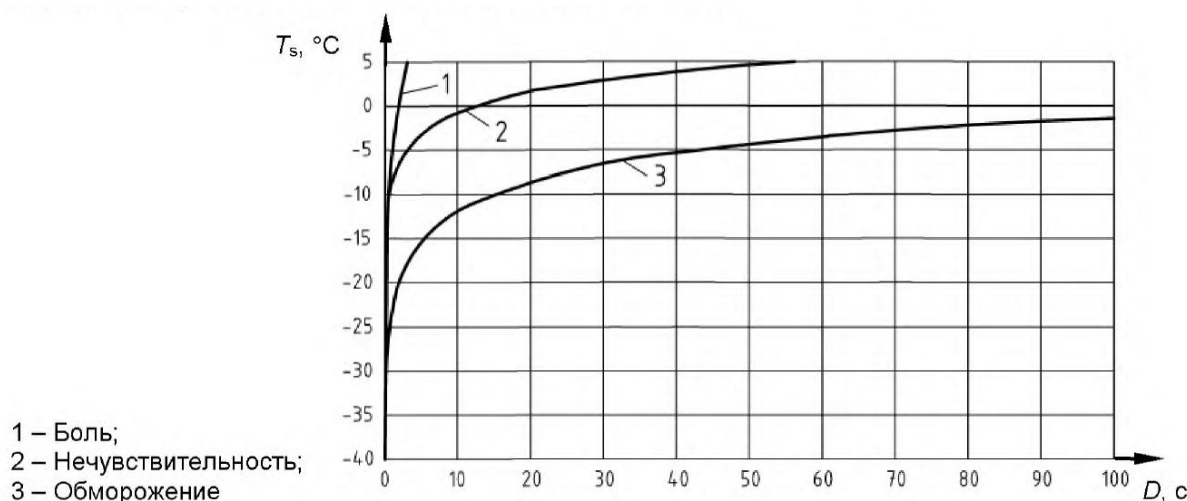


Рисунок 3. Кривые функциональной зависимости пороговых значений возникновения трех видов последствий при контакте пальца со стальной поверхностью

Расчет толщины стенки произведен по методике, приведенной в [15], при этом в качестве материала сопла была взята сталь 10Г2 с временным сопротивлением разрыву и пределом текучести равными 510 и 370 МПа соответственно. Для проверки надежности работы установки, с рассчитанным значением толщины стенки был получен прочностной расчет учитывающий нагрузку от давления потока и температурные деформации в программной среде ANSYS Static Structural и Steady-State Thermal. Результаты данных расчетов приведены ниже.

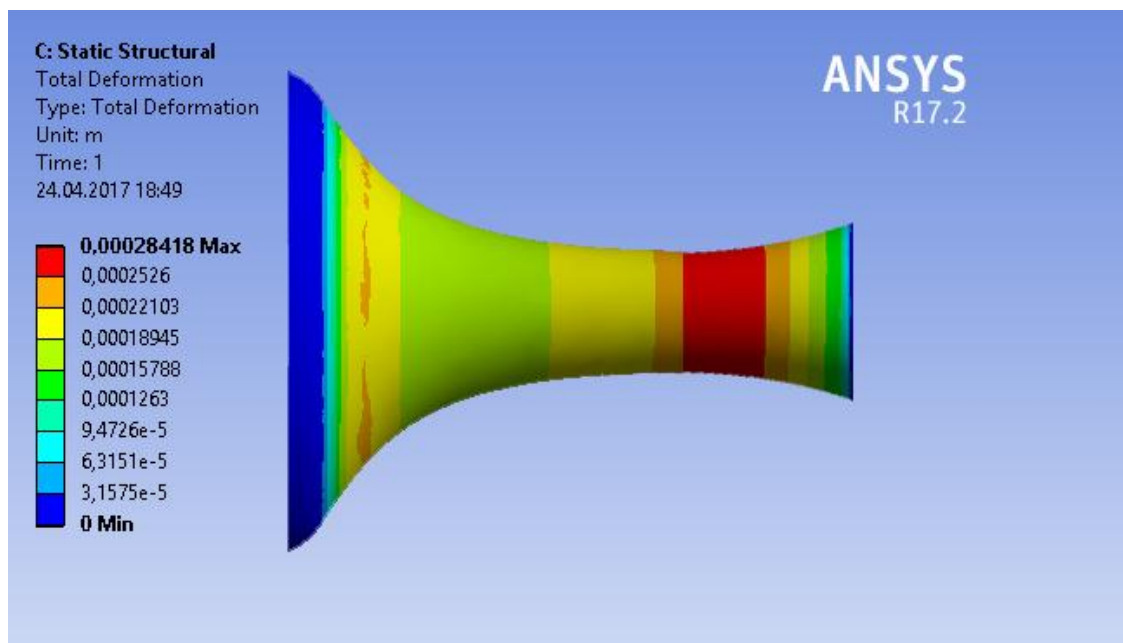


Рисунок 4. Деформации по длине профиля

Выводы. В ходе проведенной работы выявлены зависимости, наглядно демонстрирующие, что деформации незначительны, значит толщина и материал стенки подобраны верно. Это обеспечит надежную и безопасную эксплуатацию рассматриваемого оборудования.

Список используемых источников

1 Повышение безопасности эксплуатации газопроводов/
Н. Х. Абдрахманов, В. М. Давлетов, К. Н. Абдрахманова, В. В. Ворохобка,
Р. Н. Абдрахманов // Нефтегазовое дело: науч. техн. журн./УГНТУ. 2016.
Т.14, №3. С 183-187.

2 Системы оценки риска возникновения аварийных ситуаций на
объектах нефтегазовой отрасли/ Н. Х. Абдрахманов, З. А. Закирова,
Г. Ф. Заляева, Р. А. Кускильдин // Нефтегазовое дело: науч. техн.
журн./УГНТУ. 2017. Т.15, №1. С 226-230.

3 Бекиров Т. М., Ланчаков Г. А. Технология обработки газа и
конденсата М.: Недра-Бизнесцентр, 1999. 595 с.

4 Обеспечение безопасности технологических трубопроводных систем на предприятиях нефтегазового комплекса/ Н. Х. Абдрахманов, А. А. Турдыматов, К. Н. Абдрахманова, В. В. Ворохобко // Нефтегазовое дело: науч. техн. журн./УГНТУ. 2015. Т.13, №4. С. 254-260.

5 Юрнеев В. Н., Лебедев П. Д. Теплотехнический справочник. В 2. т.; изд. 2-е, перераб. М.: Энергия, 1976. Т. 2. 896 с.

6 Абдрахманова К. Н., Кузеев И. Р., Гареева Э. Р. Анализ современных методов ремонта трещин в технологическом оборудовании и трубопроводе с целью увеличения эксплуатационной безопасности//Вестник молодого ученого УГНТУ: науч. техн. журн./УГНТУ. 2016. №4. С.122-126.

7 Федосов А. В., Солодовников А. В. Организация безопасного проведения работ с повышенной опасностью в организациях по обслуживанию населения: монография. Уфа: изд-во УГНТУ, 2015. 248 с.

8 Солодовников А. В., Абдрахманов Н. Х. Организация работы кабинета охраны труда и уголка охраны труда на предприятиях нефтяной и газовой промышленности. Уфа: изд.-во УГНТУ, 2015. 84 с.

9 Федосов А. В., Хазинурова Л. С., Вадулина Н. В. Некоторые вопросы проведения специальной оценки условий труда // Нефтегазовое дело: электрон. журн. 2015. №2. С.457-476.

10 Исследование и анализ нестационарности возникновения и развития потенциально опасных ситуаций при эксплуатации опасных производственных объектов/ Н. Х. Абдрахманов, Н. В. Шутов, К. Н. Абдрахманова, В. В. Ворохобко, Р. А. Шайбаков// Нефтегазовое дело: электрон. журн. 2015. №1. С.292-306

11 Байбурин Р. А., Абдрахманов Н. Х., Абдрахманова К. Н. Применение нечеткой логики в оценке риска отказов и аварий на магистральных нефтепроводах // Нефтегазовое дело: электрон. журн. 2015. №4. С.512-537.

12 Абдрахманов Н. Х., Шайбаков Р. А Автоматизированная система управления рисками// Актуальные вопросы разработки нефтегазовых месторождений на поздних стадиях. Технологии. Оборудование. Безопасность. Экология: материалы науч.-практ. конф. 26-27 мая 2010 г. Уфа: УГНТУ, 2010. 258 с.

13 Анализ отечественного и зарубежного опыта исследований в области безопасного проектирования и эксплуатации технологических объектов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств / Н. Х. Абдрахманов, В. П. Матвеев, А. С. Нищета, В. В. Савицкий, О. А. Доржиева, Т. А. Хакимов // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2015. №5. С.162-164.

14 Абдрахманов Н. Х. Требования к информационному, организационному и техническому обеспечению построения информационно- управляющей системы безопасности для предприятий нефтегазоперерабатывающей промышленности/ Н. Х. Абдрахманов, К. Н. Абдрахманова, В. В. Ворохобко, Р. Н. Абдрахманов // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов: науч. техн. журн. 2016. № 2 (8). С. 14-17.

15 Типовые расчеты при сооружении и ремонте нефтепроводов/ Л. И. Быков, Ф. М. Мустафин, С. К. Рафиков, А. М. Нечваль, А. Е. Лаврентьев учеб. пособие; под общ. ред. Л. И. Быкова. СПб: Недра, 2006. 91 с.

References

1 Povyshenie bezopasnosti jekspluatacii gazoprovodov/ N. H. Abdrahmanov, V. M. Davletov, K. N. Abdrahmanova, V. V. Vorohobko, R. N. Abdrahmanov // Neftegazovoe delo: nauch. tehn. zhurn./UGNTU. 2016. T.14, №3. S 183-187. [in Russian].

2 Системы оценки риска возникновения аварийных ситуаций на объектах нефтегазовой отрасли/ N. H. Abdrahmanov, Z. A. Zakirova, G. F. Zaljaeva, R. A. Kuskil'din // Neftegazovoe delo: nauch. tehn. zhurn./UGNTU. 2017. T.15, №1. S 226-230. [in Russian].

3 Bekirov T. M., Lanchakov G. A. Tehnologija obrabotki gaza i kondensata M.: Nedra-Biznescentr, 1999. 595 s. [in Russian].

4 Obespechenie bezopasnosti tehnologicheskikh truboprovodnyh sistem na predpriyatijah neftegazovogo kompleksa/ N. H. Abdrahmanov, A. A. Turdymatov, K. N. Abdrahmanova, V. V. Vorohobko // Neftegazovoe delo: nauch. tehn. zhurn./UGNTU. 2015. T.13, №4. S. 254-260. [in Russian].

5 JurneeV V. N., Lebedev P. D. Teplotehnicheskij spravochnik. V 2. t.; izd. 2-e, pererab. M.: Jenergija, 1976. T. 2. 896 s. [in Russian].

6 Abdrahmanova K. N., Kuzeev I. R., Gareeva Je. R. Analiz sovremennyh metodov remonta treshhin v tehnologicheskom oborudovanii i truboprovode s cel'ju uvelichenija jekspluacionnoj bezopasnosti//Vestnik molodogo uchenogo UGNTU: nauch. tehn. zhurn. /UGNTU. 2016. №4. S.122-126. [in Russian].

7 Fedosov A. V., Solodovnikov A. V. Organizacija bezopasnogo provedenija rabot s povyshennoj opasnost'ju v organizacijah po obsluzhivaniju naselenija: monografija. Ufa: izd-vo UGNTU, 2015. 248 s.[in Russian].

8 Solodovnikov A. V., Abdrahmanov N. H. Organizacija raboty kabineta ohrany truda i ugolka ohrany truda na predpriyatijah neftjanoj i gazovoj promyshlennosti. Ufa: izd.-vo UGNTU, 2015. 84 s. [in Russian].

9 Fedosov A. V., Hazinurova L. S., Vadulina N. V. Nekotorye voprosy provedenija special'noj ocenki uslovij truda // Neftegazovoe delo: jelektron. zhurn. 2015. №2. S.457-476. [in Russian].

10 Issledovanie i analiz nestacionarnosti vozniknovenija i razvitija potencial'no opasnyh situacij pri jekspluacii opasnyh proizvodstvennyh ob#ektov/ N. H. Abdrahmanov, N. V. Shutov, K. N. Abdrahmanova, V. V. Vorohobko, R. A. Shajbakov// Neftegazovoe delo: jelektron. zhurn. 2015. №1. S.292-306. [in Russian].

11 Bajburin R. A., Abdrahmanov N. H., Abdrahmanova K. N. Primenenie nechetkoj logiki v ocenke riska otkazov i avarij na magistral'nyh nefteprovodah // Neftegazovoe delo: jelektron. zhurn. 2015. №4. S.512-537. [in Russian].

12 Abdrahmanov N. H., Shajbakov R. A Avtomatizirovannaja sistema upravlenija riskami// Aktual'nye voprosy razrabotki neftegazovyh mestorozhdenij na pozdnih stadijah. Tehnologii. Oborudovanie. Bezopasnost'. Jekologija: materialy nauch.-prakt. konf. 26-27 maja 2010 g. Ufa: UGNTU, 2010. 258 s. [in Russian].

13 Analiz otechestvennogo i zarubezhnogo opyta issledovanij v oblasti bezopasnogo proektirovanija i jekspluatacii tehnologicheskikh ob#ektov neftepererabatyvajushhij i neftehimicheskij proizvodstv / N. H. Abdrahmanov, V. P. Matveev, A. S. Nishheta, V. V. Savickij, O. A. Dorzhieva, T. A. Hakimov // Jekspertiza promyshlennoj bezopasnosti i diagnostika opasnyh proizvodstvennyh ob#ektov. 2015. №5. S.162-164. [in Russian].

14 Abdrahmanov N. H. Trebovanija k informacionnomu, organizacionnomu i tehničeskomu obespečeniju postroenija informacionno- upravljajushhej sistemy bezopasnosti dlja predpriyatij neftegazopererabatyvajushhej promyshlennosti/ N. H. Abdrahmanov, K. N. Abdrahmanova, V. V. Vorohobko, R. N. Abdrahmanov // Jekspertiza promyshlennoj bezopasnosti i diagnostika opasnyh proizvodstvennyh ob#ektov: nauch. tehn. zhurn. 2016. № 2 (8). S. 14-17. [in Russian].

15 Tipovye raschety pri sooruzhenii i remonte nefteprovodov/ L. I. Bykov, F. M. Mustafin, S. K. Rafikov, A. M. Nechval', A. E. Lavrent'ev ucheb. posobie; pod obshh. red. L.I. Bykova. SPb: Nedra, 2006. 91 s. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Галлямов В. Р., студент гр. БМТ 13-01 ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа,
Российская Федерация

V. R. Gallyamov, Student of BMT 13-01 FSBEI HE «USPTU», Ufa,
Russian Federation

email: vgalliamov@gmail.com

Колчин А. В., преподаватель, руководитель проекта; ФГБОУ ВО
«УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

A.V. Kolchin, Teacher, Project Manager FSBEI HE «USPTU», Ufa,
Russian Federation

email: kolchin-alexander@mail.ru

Вадулина Н. В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная
безопасность и охрана труда» ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская
Федерация

N. V. Vadulina, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of
the Chair «Industrial Safety and Labor Protection» FSBEI HE «USPTU», Ufa,
Russian Federation

email: pbot@mail.ru

Салимов А. О., студент гр. БАЭ 16-01 ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа,
Российская Федерация

A. O. Salimov, Student of BAE 13-01 FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian
Federation

Ворохобко В. В., магистрант гр. МТП-21-16-01 ФГБОУ ВО «УГНТУ»,
г. Уфа, Российская Федерация.

V. V. Vorokhobko, student of MBP-21-16-01, FSBEI HE «USPTU», Ufa,
Russian Federation

email: akarinan@mail.ru