

УДК 620.197

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

INCREASING THE EFFICIENCY OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION

А.С. Хисматуллин, Т.Г. Загитов, Г.С. Прокоп

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
филиал, г. Салават, Российская Федерация**

Azat S. Khismatullin, Timur G. Zagitov, Georgy S. Prokop

**Ufa State Petroleum Technological University, Branch, Salavat,
Russian Federation**

e-mail: hism5az@mail.ru

Аннотация. Целью работы является совершенствование системы катодной защиты трубопроводов путем разработки и внедрения рекомендаций по повышению эффективности электрохимической защиты.

В статье приведен анализ современного состояния защиты трубопроводов от коррозии, исследованы виды коррозионных разрушений трубопроводов, разработан метод диагностики коррозионного поражения подземных трубопроводов, с помощью которого можно определить вид коррозионного поражения с вероятностью 80 %. Также разработан перечень мероприятий по совершенствованию системы коррозионной защиты трубопроводов и снижению негативного воздействия на металл магистральных газопроводов.

Abstract. The aim of the work is to improve the system of cathodic protection of pipelines by developing and implementing recommendations for increasing the efficiency of electrochemical protection.

The article analyzes the accident rate at enterprises, corrosion of pipelines, analysis of the current state of protection of pipelines from corrosion, investigates the types of corrosion damage to pipelines, developed a method for diagnosing the type of corrosion damage to underground pipelines, which can be used to determine the type of corrosion damage with a probability of 80 %. A list of measures was also developed to improve the corrosion protection system of pipelines and reduce the negative impact on the metal of main gas pipelines.

Ключевые слова: трубопровод; защита; аварийность; коррозия; заземление

Keywords: pipeline; protection; accident rate; corrosion; grounding

Подземные газопроводы являются сложным и дорогостоящим промышленным объектом, предназначенным для снабжения высокоэффективным теплоносителем промышленных и коммунальных объектов в России и за ее пределами. Эксплуатация газопроводов содержит в себе риск возникновения разрывов труб и развития крупномасштабных аварий.

На сегодняшний день общая протяженность линейной части магистральных трубопроводов в Российской Федерации превышает 200 тыс. км. Известно, что основная часть газотранспортной системы России была построена в 70-80-е годы прошлого века. К настоящему времени износ основных фондов по линейной части магистральных газопроводов составляет более половины.

Для анализа причин и прогнозирования на ближайшую перспективу ожидаемой интенсивности аварий были использованы данные и обобщения, публикуемые в официальных источниках, в том числе в ежегодных отчетах Ростехнадзора. Федеральный государственный надзор в области промышленной безопасности осуществляется в отношении 4273 опасных

производственных объектов магистрального трубопроводного транспорта (<http://www.gosnadzor.ru>).

В 2018 г. на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта произошло 12 аварий.

В сравнении с 2017 г. (6 аварий) на объектах магистрального трубопроводного транспорта количество аварий увеличилось в 2 раза.

Экономический ущерб от произошедших аварий в 2018 г. составил 190 млн 799 тыс. руб. (в 2017 г. – 79 млн 38 тыс. руб.), из них экологический ущерб – 2 млн 113 тыс. руб. (в 2017 г. – 62,1 тыс. руб.). Распределение аварий по отраслям промышленности приведено в таблице 1.

Таблица 1. Распределение аварий по отраслям промышленности

Отрасли промышленности	2017 г.	2018 г.
Газопроводы	5	10
Нефтепроводы	1	2
Нефтепродуктопроводы	0	0
Аммиакопроводы	0	0
Объекты подземного хранения газа (ПХГ)	0	0
Всего:	6	12

Моделирование электрического поля катодной защиты при взаимном влиянии анодных и защитных заземлений

Компьютерное моделирование дает возможность автоматизировать однотипные вычисления, выполняемые с использованием разработанной математической модели с целью определения наиболее оптимального варианта геометрических, электрохимических и электрических параметров проектируемых систем катодной защиты и защитного заземления [1–8].

Программное обеспечение позволяет проводить исследование закономерностей влияния защитного заземления, имеющего электрический контакт с трубопроводом, на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом

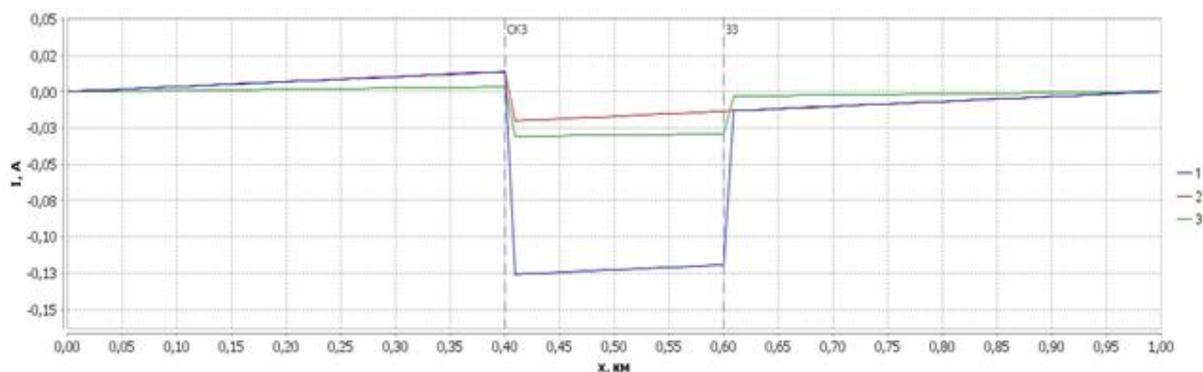
при различных значениях следующих параметров: продольное сопротивление трубопровода Z , проводимость изоляционного покрытия Y , длина рассматриваемого участка трубопровода L , линейная координата точки подключения к трубопроводу станции катодной защиты $x_{СКЗ}$, расстояние от трубопровода до анодного заземления станции катодной защиты $y_{СКЗ}$, линейная координата точки подключения к трубопроводу защитного заземления $x_{ЗЗ}$, расстояние от трубопровода до защитного заземления $y_{ЗЗ}$, удельное сопротивление грунта $\rho_{гр}$, сила тока станции катодной защиты $I_{СКЗ}$, сопротивление растеканию тока защитного заземления $R_{ЗЗ}$.

Исследование влияния защитного заземления

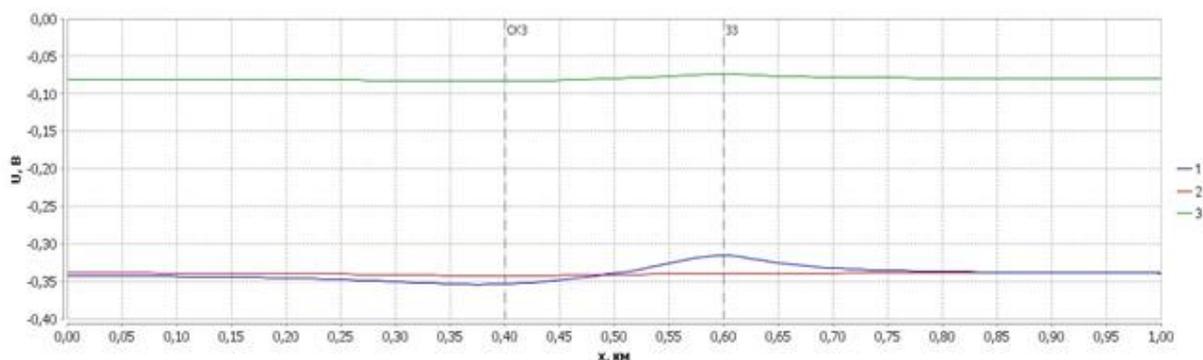
Разработанное программное обеспечение позволяет производить расчет распределения силы тока в трубопроводе и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом при наличии подключенных к трубопроводу станций катодной защиты и электрического контакта между трубопроводом и защитными заземлениями электроустановок.

Рассмотрим участок подземного трубопровода со следующими параметрами: $Z = 12$ мкОм/м (такую величину продольного сопротивления имеет трубопровод с наружным диаметром 530 мм и толщиной стенки 8 мм), $Y = 100$ мкСм/м, $L = 1$ км.

Пусть в точке с линейной координатой $x_{СКЗ} = 0,40$ км к трубопроводу подключена станция катодной защиты, анодное заземление которой расположено на расстоянии $y_{СКЗ} = 0,10$ км от трубопровода, удельное сопротивление грунта $\rho_{гр} = 100$ Ом·м. Результаты расчета зависимостей $I(x)$ и $U(x)$ при силе тока станции катодной защиты $I_{СКЗ} = 0,034$ А представлены на рисунке 1 (кривые под номером 2).



а)



б)

$x_{СКЗ} = 0,40$ км, $y_{СКЗ} = 0,10$ км, $x_{ЗЗ} = 0,60$ км, $y_{ЗЗ} = 0,05$ км, $\rho_{zp} = 100$ Ом·м.
 $I_{СКЗ} = 0,14$ А, $R_{ЗЗ} = 3$ Ом (1), $I_{СКЗ} = 0,034$ А, без защитного заземления
 $(R_{ЗЗ} = \infty)$ (2), $I_{СКЗ} = 0,034$ А, $R_{ЗЗ} = 3$ Ом (3)

Рисунок 1. Зависимости $I(x)$ (а) и $U(x)$ (б)

Пусть в точке с линейной координатой $x_{ЗЗ} = 0,60$ км к трубопроводу подключено защитное заземление, расположенное на расстоянии $y_{ЗЗ} = 0,05$ км от трубопровода, сопротивление растеканию тока защитного заземления $R_{ЗЗ} = 3$ Ом.

В этом случае при том же значении $I_{СКЗ}$ зависимости $I(x)$ и $U(x)$ существенно изменяются (кривые под номером 3 на рисунке 1). В частности, значения U на рассматриваемом участке трубопровода уменьшаются (по абсолютной величине) приблизительно на 0,26 В. Для возвращения U к прежнему уровню необходимо увеличить $I_{СКЗ}$ до 0,14 А (кривые под номером 1 на рисунке 1). При этом в районе точки подключения

защитного заземления к трубопроводу наблюдается локальное уменьшение (по абсолютной величине) значений U .

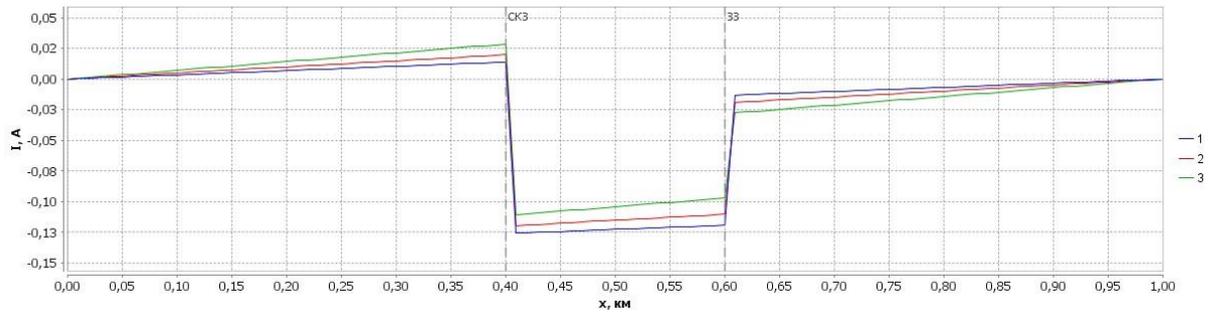
Таким образом, наличие электрического контакта между трубопроводом и защитным заземлением приводит к изменению распределения силы тока катодной защиты в трубопроводе, что сопровождается уменьшением (по абсолютной величине) разности потенциалов между трубопроводом и грунтом, особенно выраженным в районе точки подключения защитного заземления к трубопроводу.

При увеличении сопротивления растеканию тока защитного заземления уменьшается сила тока утечки через защитное заземление, в результате разность потенциалов между трубопроводом и грунтом при неизменной силе тока станции катодной защиты увеличивается по абсолютной величине (рисунок 2).

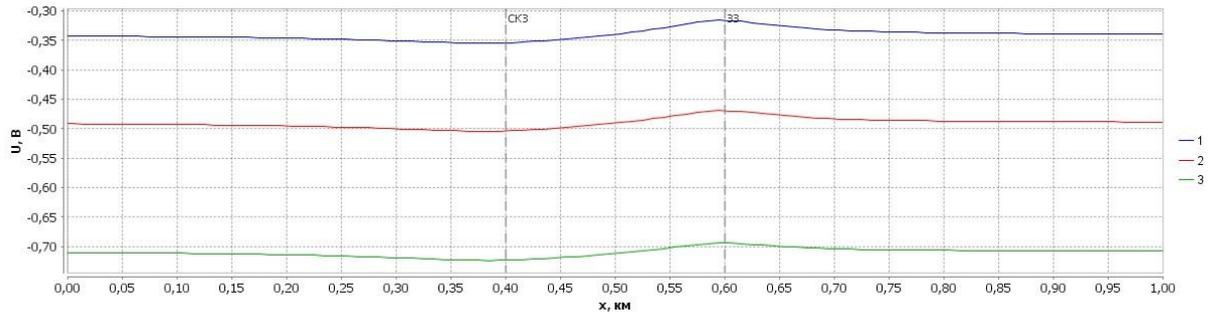
Увеличение силы тока станции катодной защиты приводит к увеличению абсолютной величины разности потенциалов между трубопроводом и грунтом.

При уменьшении удельного сопротивления грунта наблюдается уменьшение абсолютного значения разности потенциалов между трубопроводом и грунтом на большей части рассматриваемого участка трубопровода. При этом сглаживается характерный экстремум зависимости $U(x)$ в районе точки подключения станции катодной защиты. Значения $U(x)$ в районе точки подключения защитного заземления не зависят от величины удельного сопротивления грунта.

Проведя лабораторные исследования влияния защитных заземлений электроустановок на эффективность электрохимической защиты подземных трубопроводов [6] установлено, что наиболее существенное влияние на изменение величины потенциала «труба – земля» оказывают заземления, расположенные вблизи подземного трубопровода: чем ближе защитное заземление к анодному заземлению, тем менее выражено экранирующее влияние.



а)



б)

при $x_{33} = 0,60$ км, $x_{CK3} = 0,40$ км, $y_{CK3} = 0,10$ км, $y_{33} = 0,05$ км,

$$I_{CK3} = 0,14 \text{ А}, \rho_{2p} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

$$R_{33} = 3 \text{ Ом (1)}, R_{33} = 5 \text{ Ом (2)}, R_{33} = 10 \text{ Ом (3)}$$

Рисунок 2. Зависимости $I(x)$ (а) и $U(x)$ (б)

Применение защитных заземлений из меди значительно смещает потенциал «труба – земля» в положительную область и приводит к несоответствию уровня защищенности трубопровода нормативным требованиям.

Экспериментально установлено, что с увеличением расстояния между защищаемым трубопроводом и защитным заземлением увеличивается сила тока, натекающего на защитное заземление, что обуславливает нерациональное потребление электроэнергии и повышенный расход материала анодных заземлений.

В экспериментальных условиях установлены графические зависимости коэффициента экранирования от расположения защитного заземления относительно подземного трубопровода, а именно от угловой пространственной ориентации защитного заземления относительно защищаемого сооружения и анодного заземления.

Обнаружена сильная корреляционная связь между максимальными значениями КЭТКЗ и соответствующими им значениями силы тока, что требует учета при разработке и реализации технических мероприятий, направленных на исключение негативного влияния контуров защитных заземлений энергоиспользующих установок на защиту от коррозии трубопроводов промышленных площадок.

Основными типами материалов [9–12], применяемых в системах защитного заземления, являются черная сталь, оцинкованная сталь и медь. На стадии проектирования, как правило, не учитывается тот факт, что контуры защитного заземления могут оказывать влияние на функционирование систем ЭХЗ. Анализ проектных решений показывает, что наиболее частыми причинами возникновения эффекта экранирования катодного тока является сближение контуров защитного заземления с подземными технологическими трубопроводами, необоснованное использование большого количества точечных заземляющих электродов, увеличение сечения заземлителей и т.д.

Выводы

При выполнении работы получены следующие выводы:

- проведены исследования влияния взаимного расположения станции катодной защиты и защитного заземления на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом, и характеристик станции катодной защиты, защитного заземления и грунта на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом;
- показано, что при увеличении сопротивления растеканию тока защитного заземления с 3 Ом до 10 Ом разность потенциалов между трубопроводом и грунтом при неизменной силе тока станции катодной защиты увеличивается по абсолютной величине на 0,37 В.

Список используемых источников

1. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Sirotina E.V. Cooling System Oil-Immersed Transformers with the Use of a Circulating Sulfur Hexafluoride // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2020. Vol. 641 LNEE. P. 613-621. DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_67.

2. Vasilev I., Hismatullin A. The Theory of Fuzzy Sets as a Means of Assessing the Periods of Service of Asynchronous Electric Motors // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Proceedings 2020 International Conference. Sochi, Russia. 2020. Article Number 9111887. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111887.

3. Vildanov R.G., Khismatullin A.S., Luneva N.N. Economic Aspects of Reactive Power Compensation at Gas-Chemical Plant // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. Article Number 012108. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012108.

4. Баширов М.Г., Грибовский Г.Н., Галлямов Р.У., Гареев И.М., Хисматуллин А.С. Рекомендации по повышению надежности электроснабжения промышленной площадки линейно-производственного управления магистральных газопроводов // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 2 (31). С. 23-26. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-2(31)-23-26.

5. Будник В.А., Евдокимова Н.Г., Жирнов Б.С. Битумные эмульсии. Особенности состава и применения // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2006. № 1. С. 28. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Budnik/Budnik_1.pdf (дата обращения: 09.01.2021).

6. Габидуллин И.И., Хисматуллин А.С. Совершенствование системы катодной защиты трубопроводов газораспределительных сетей // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – 2020: Материалы Международной научно-методической конференции. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. С. 352-355.

7. Давлетшин Р.А., Хисматуллин А.С., Ахметов А.Э. Исследование нечеткого регулятора на основе трехфазного сепаратора нефти и газа // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 12 (102). С. 150-154.

8. Муллакаев М.С., Муллакаев Р.М., Хисматуллин А.С. Технико-экономическое обоснование проекта «Сонохимическая технология и комплекс очистки нефтезагрязненных стоков» // Современная научная мысль. 2020. № 5. С. 136-141. DOI: 10.24412/2308-264X-2020-5-136-142.

9. Муллакаев М.С. Современное состояние проблемы извлечения нефти // Современная научная мысль. 2013. № 4. С. 185-191.

10. Комарова Е.В., Евдокимова Н.Г., Марданова М.Р. Регулирование свойств сырья атмосферно-вакуумной перегонки с целью увеличения выхода светлых нефтепродуктов // Нефтегазовое дело. 2013. Т. 11. № 4. С. 141-144.

11. Иневатов В.С., Хисматуллин А.С. Совершенствование системы электрического обогрева трубопроводов для перекачки вязких углеводородов // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – 2020: Материалы Международной научно-методической конференции. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. С. 355-357.

12. Шотиди К.Х., Аюпова З.С., Созыкина М.М. Предотвращение аварий трубопроводов природного газа в условиях крайнего севера // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2019. № 4 (289). С. 9-13. DOI: 10.33285/2411-7013-2019-4(289)-9-13.

References

1. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Sirotina E.V. Cooling System Oil-Immersed Transformers with the Use of a Circulating Sulfur Hexafluoride. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020, Vol. 641 LNEE, pp. 613-621. DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_67.

2. Vasilev I., Hismatullin A. The Theory of Fuzzy Sets as a Means of Assessing the Periods of Service of Asynchronous Electric Motors. *Proceedings 2020 International Conference «Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)»*. Sochi, Russia, 2020, Article Number 9111887. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111887.

3. Vildanov R.G., Khismatullin A.S., Luneva N.N. Economic Aspects of Reactive Power Compensation at Gas-Chemical Plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 560, Article Number 012108. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012108.

4. Bashirov M.G., Gribovskii G.N., Gallyamov R.U., Gareev I.M., Khismatullin A.S. Rekomendatsii po povysheniyu nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennoi ploshchadki lineino-proizvodstvennogo upravleniya magistral'nykh gazoprovodov [Recommendations for Improving the Reliability of Electricity Supply at Industrial Site of Linear Pipe Operation]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы – Electrotechnical Systems and Complexes*, 2016, No. 2 (31), pp. 23-26. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-2(31)-23-26. [in Russian].

5. Budnik V.A., Evdokimova N.G., Zhirnov B.S. Bitumnyye emul'sii. Osobennosti sostava i primeneniya [Bituminous Emulsions. Features of the Composition and Application]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» – Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2006, No. 1, pp. 28. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Budnik/Budnik_1.pdf (accessed 09.01.2021). [in Russian].

6. Gabidullin I.I., Khismatullin A.S. Sovershenstvovanie sistemy katodnoi zashchity truboprovodov gazoraspredelel'nykh setei [Improvement of the Cathodic Protection System for Pipelines of Gas Distribution Networks]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii «Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya – 2020»* [Materials of the International Scientific and Methodological Conference «Integration of Science and Education in Oil and Gas Universities – 2020»]. Ufa, UGNTU Publ., 2020, pp. 352-355. [in Russian].

7. Davletshin R.A., Khismatullin A.S., Akhmetov A.E. Issledovanie nechetkogo regulatora na osnove trekhfaznogo separatora nefti i gaza [Investigation of Fuzzy Regulator Based on Oil and Gas Separator]. *Nauka i biznes: puti razvitiya – Science and Business: Development Ways*, 2019, No. 12 (102), pp. 150-154. [in Russian].

8. Mullakaev M.S., Mullakaev R.M., Khismatullin A.S. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie proekta «Sonokhimicheskaya tekhnologiya i kompleks ochistki neftezagryaznennykh stokov» [Technical-Economic Substantiation of the Project «Sonochemical Technology and the Complex for Treatment of Oil-Contaminated Wastes»]. *Sovremennaya nauchnaya mysl' – Modern Scientific Thought*, 2020, No. 5, pp. 136-141. DOI: 10.24412/2308-264X-2020-5-136-142. [in Russian].

9. Mullakaev M.S. Sovremennoe sostoyanie problemy izvlecheniya nefti [Current State of Oil Recovery]. *Sovremennaya nauchnaya mysl' – Modern Scientific Thought*, 2013, No. 4, pp. 185-191. [in Russian].

10. Komarova E.V., Evdokimova N.G., Mardanova M.R. Regulirovanie svoystv syr'ya atmosferno-vakuumnoi peregonki s tsel'yu uvelicheniya vykhoda svetlykh nefteproduktov [Atmospheric Vacuum Distillation Feedstock Properties Control for Light Petroleum Products Yield Enhancement]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2013, Vol. 11, No. 4, pp. 141-144. [in Russian].

11. Inevatov V.S., Khismatullin A.S. Sovershenstvovanie sistemy elektricheskogo obogreva truboprovodov dlya perekachki vyazkikh uglevodorodov [Improvement of the Electrical Heating System for Pipelines for Pumping Viscous Hydrocarbons]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii «Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya – 2020»* [Materials of the International Scientific and Methodological Conference «Integration of Science and Education in Oil and Gas Universities – 2020»]. Ufa, UGNTU Publ., 2020, pp. 355-357. [in Russian].

12. Shotidi K.Kh., Ayupova Z.S., Sozykina M.M. Predotvrashchenie avarii truboprovodov prirodnogo gaza v usloviyakh krainego severa [Prevention of Accidents with Natural Pipelines in Conditions of the Far North]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse – Environment Protection in Oil and Gas Complex*, 2019, No. 4 (289), pp. 9-13. DOI: 10.33285/2411-7013-2019-4(289)-9-13. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Хисматуллин Азат Салаватович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», УГНТУ, филиал, г. Салават, Российская Федерация

Azat S. Khismatullin, Candidate Physics and Mathematics Sciences, Assistant Professor of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, USPTU, Branch, Salavat, Russian Federation

e-mail: hism5az@mail.ru

Загитов Тимур Галиевич, студент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», УГНТУ, филиал, г. Салават, Российская Федерация

Timur G. Zagitov, Student of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, USPTU, Branch, Salavat, Russian Federation

e-mail: hism5az@mail.ru

Прокоп Георгий Святославович, студент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», УГНТУ, филиал, г. Салават, Российская Федерация

Georgy S. Prokop, Student of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, USPTU, Branch, Salavat, Russian Federation

e-mail: hism5az@mail.ru