

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-5-75-82

УДК 622.692.23.07

**А.С. Собачкин** (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

## РАСЧЁТ ВЕРОЯТНОСТИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ НЕФТЕПРОВОДОВ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ПЕРЕКАЧИВАЕМОЙ НЕФТИ, В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ

**Aleksandr S. Sobachkin** (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

### PROBABILITY OF PIPING INTEGRITY LOSS UNDER THE PUMPED OIL PRESSURE IN THE WELDING PROCESS

#### **Введение**

Сварочные работы на нефтепроводах, находящихся под давлением перекачиваемой нефти, относятся к опасным работам, так как случайное сквозное проплавление стенки нефтепровода может привести к аварийной ситуации, связанной с разгерметизацией нефтепровода. В процессе разработки технологии сварочных работ на действующих нефтепроводах необходимо установить вероятность разгерметизации нефтепровода и возникновения пожароопасной ситуации при проведении сварки.

#### **Цели и задачи**

Разработка методики и расчёт вероятности сквозного проплавления и разгерметизации нефтепровода, находящегося под давлением перекачиваемой нефти, в процессе сварки.

#### **Результаты**

Разработана методика расчёта вероятности разгерметизации действующих нефтепроводов, находящихся под давлением в процессе сварки, что позволило доказать соответствие технологического процесса ведения сварочных работ на нефтепроводах без остановки перекачки требованиям нормативных документов на промышленную и пожарную безопасность.

#### **Background**

Welding in oil pipelines under pressure from the pumped oil is a hazardous job, as accidental through penetration of the oil pipeline wall can lead to an emergency situation related to the loss of piping integrity. In the process of developing welding technology for existing pipelines, it is necessary to establish the probability of piping integrity loss and the occurrence of a fire hazard during the welding process.

#### **Aims and Objectives**

Development of a methodology and calculation of the probability of through-penetration and loss of piping integrity under pressure from the pumped oil during welding.

#### **Results**

A method has been developed for calculating the probability of piping integrity loss of existing oil pipelines that are under pressure during the welding process, which allowed us to prove the conformity of the technological process of conducting welding operations in oil pipelines without stopping pumping with the requirements of regulatory documents for industrial and fire safety.

**Ключевые слова:** безопасность; сварочные работы; вероятность; сквозное проплавление; пожарная безопасность; время горения сварочной дуги; сварочный ток; давление

**Key words:** security; welding work; probability; through penetration; fire safety; arc burning time; welding current; pressure

Согласно нормативным документам, регламентирующим пожарную безопасность технологических процессов, технологический процесс считается безопасным, если вероятность возникновения пожара или отказа на один пожароопасный узел в год не превышает  $10^{-6}$  [1].

За один пожароопасный узел в технологии сварки на действующих нефтепроводах принималось однократное зажигание и горение сварочной дуги на поверхности нефтепровода. Для коррозионных повреждений стенки нефтепровода число пожароопасных узлов практически совпадает с числом повреждений.

Если вероятность сквозного проплавления стенки нефтепровода меньше или равна нормативной вероятности пожарной безопасности, то сварочные работы могут применяться для проведения ремонтных работ на действующих нефтепроводах [1-3].

Для определения уровня пожарной безопасности были проведены исследования по сквозному проплавлению стенки стенда, заполненного нефтью и находящегося под давлением.

Стенд представлял собой трубу с внешним диаметром 529 мм и толщиной стенки 7,8 мм из стали 17ГС. Труба заглушалась сферическими заглушками и присоединялась к кольцевому нефтепроводу для создания внутреннего давления.

На поверхности стенда, находящегося под давлением нефти, штучными электродами зажигалась сварочная дуга. Electroды прикреплялись к рычагу длиной 3 м. Сварщик, манипулируя электродом, осуществлял сквозное проплавление стенки стенда. Труба устанавливалась в траншею. Для сварщика было оборудовано специальное укрытие.

Сквозное проплавление (прожигание) стенки осуществлялось электродами диаметром 4 мм. Всего было произведено 74 прожога при давлении в стенде от 0,5 до 7,5 МПа при толщине стенки от 5,0 до 7,8 мм. Сварочный ток изменялся от 140 до 320 А.

В процессе экспериментов с помощью секундомера определялось время горения дуги до разгерметизации трубы. По экспериментальным данным построены зависимости времени горения сварочной дуги до разгерметизации трубы  $t$  от величины сварочного тока  $I$  при толщинах стенки 5,0 и 8,0 мм (рисунки 1).

Полученные зависимости аппроксимируются функцией вида (рисунок 1):

$$t \sim f\left(\frac{h}{k \cdot I \cdot U \cdot \eta}\right),$$

где  $h$  - толщина стенки нефтепровода;

$k \cdot I \cdot U \cdot \eta$  - теплота, выделяющаяся при горении сварочной дуги, Дж;

$k$  - коэффициент перевода в Джоули;

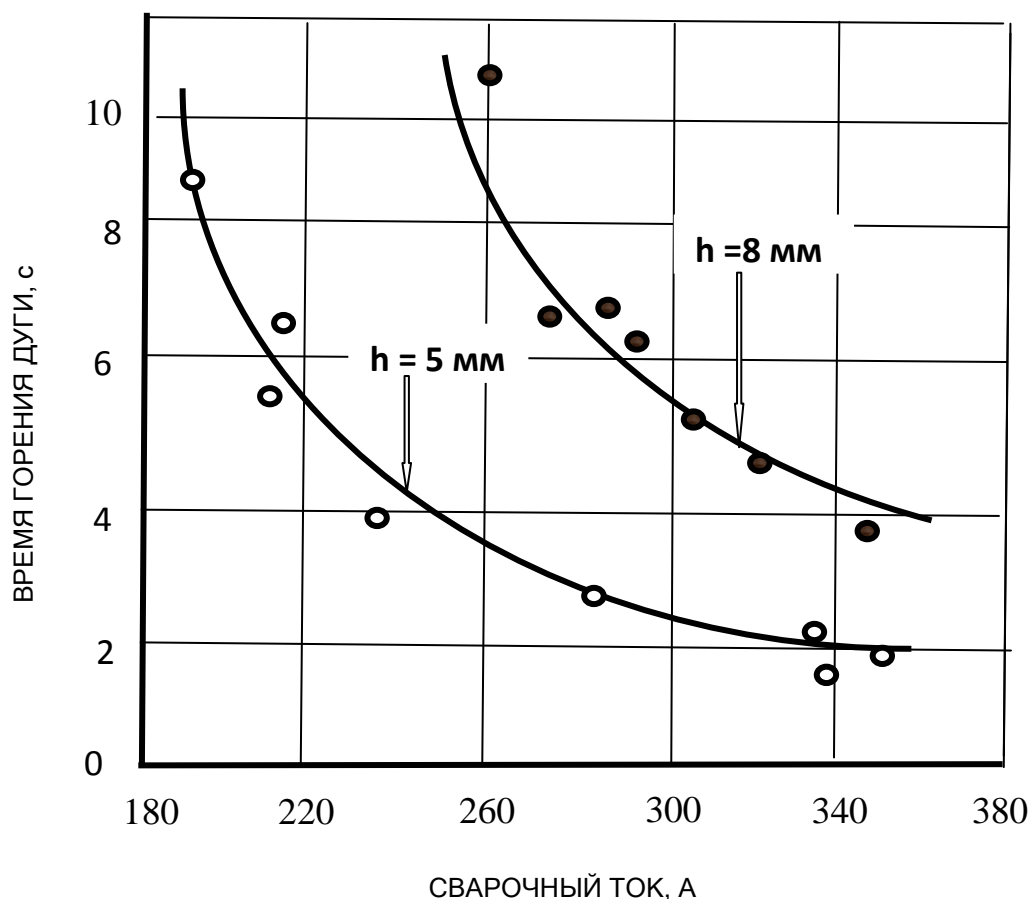
$I$  - сварочный ток, А;

$U$  - напряжение сварочной дуги, В;

$\eta$  - коэффициент полезного действия сварочного дуги при ручной дуговой сварке.

Зависимости времени сквозного проплавления от давления при данных толщинах стенки выявлено не было, так как рабочая толщина стенки согласно [4, 5] составляет 0,5 мм при внутреннем давлении до 5,0 МПа.

Полученные экспериментальные данные по определению времени сквозного проплавления показали, что величина сварочного тока, при которой возможна разгерметизация нефтепровода, составляет 160 А при остаточной толщине стенки 5,0 мм, и 250 А при толщине стенки 8,0 мм.



$h$  - толщина стенки стэнда

**Рисунок 1.** Зависимость времени горения сварочной дуги от сварочного тока при сквозном проплавлении стенки стэнда

Одним из факторов, определяющих вероятность разгерметизации нефтепровода при сварке на нефтепроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, является превышение рабочего сварочного тока и времени горения сварочной дуги [2, 6, 7].

Сварочный ток и время горения сварочной дуги до сквозного проплавления стенки трубы взаимосвязаны в соответствии с зависимостью (1). Поэтому, определив по условиям пожарной опасности критический сварочный ток, способный проплавить стенку

трубы, можно оценить безопасное время непрерывной сварки. Принимая, что разгерметизация нефтепровода под давлением при сварке сопровождается пожаром, проведём оценку времени непрерывной сварки при заданном уровне вероятности по условиям пожарной безопасности.

Величина сварочного тока при разгерметизации нефтепровода имеет разброс около среднего значения.

Предположим, что величине сварочного тока, распределенного по нормальному зако-

ну около среднего значения  $\hat{I}_{\text{ПР}}$ , соответствует наибольшая вероятность разгерметизации нефтепровода. Рабочий сварочный ток тоже непостоянен и изменяется около среднего значения по нормальному закону распределения.

Если  $\hat{I}_{\text{ПР}} > \hat{I}_{\text{РАБ}}$ , то вероятность того, что не произойдёт разгерметизация нефтепровода, описывается конечным выражением [8]:

$$P_n = \frac{1}{|\sigma|\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp - \frac{(\Delta\hat{I} - \Delta I)}{2|\sigma|_{\Sigma}^2} d(\Delta I)$$

или

$$P_n = \Phi \left[ \frac{(\hat{I} - I)}{2|\sigma|_{\Sigma}^2} \right] + 0,5 = \Phi(U) + 0,5, \quad (1)$$

где  $|\sigma|^2 = |\sigma|_{\hat{I}_{\text{ПР}}}^2 + |\sigma|_{\hat{I}_{\text{РАБ}}}^2$  - суммарное среднеквадратическое отклонение двух независимых величин  $\hat{I}_{\text{ПР}}$  и  $\hat{I}_{\text{РАБ}}$ ;

$\Delta\hat{I} = \hat{I}_{\text{ПР}} + \hat{I}_{\text{РАБ}}$  - разность средних значений;

$\Phi(U)$  - функция Лапласа.

Как следует из приведённых в таблице 1 результатов эксперимента,

при рабочем токе до  $I_{\text{РАБ}} = 160$  А предельное отклонение тока от среднего значения составляет  $\pm 5$  А,

при рабочем токе  $I_{\text{РАБ}}$  от 230 до 320 А -  $\pm 10$  А,

и свыше 320 А -  $\pm 20$  А.

**Таблица 1.** Результаты экспериментов по определению вероятности разгерметизации нефтепровода при давлении 2,0 МПа

Остаточная толщина стенки, мм	Сварочный ток, А			Отклонение сварочного тока от среднего значения, А	Время горения сварочной дуги, с	Примечание
	мин.	макс.	средн.			
4,9	165	175	170	$\pm 5$	-	произошла заварка
4,8	200	210	205	$\pm 5$	6,0	-
5,2	200	210	205	$\pm 5$	6,5	-
5,0	270	290	280	$\pm 10$	2,5	-
5,0	290	320	300	$\pm 10$	2,3	-
5,0	295	310	305	$\pm 10$	2,0	-
5,0	310	330	320	$\pm 10$	2,0	-
5,0	230	250	240	$\pm 10$	6,8	-
5,0	185	295	190	$\pm 5$	9,2	-
5,0	160	170	165	$\pm 5$	-	произошла заварка
8,0	290	310	300	$\pm 10$	7,2	-
8,0	310	330	320	$\pm 10$	4,8	-
8,0	320	360	340	$\pm 20$	4,0	-
8,0	340	380	360	$\pm 2$	3,0	-
8,0	145	155	150	$\pm 5$	-	произошла заварка
8,0	300	320	310	$\pm 10$	5,0	-

Исходя из этих данных, среднеквадратическое отклонение величин  $I_{РАБ}$  и  $I_{ПР}$  составит  $|\sigma|_{\hat{I}_{РАБ}} = 5 \text{ А}$ ,  $|\sigma|_{\hat{I}_{ПР}} = 7,5 \text{ А}$ .

Тогда суммарное среднеквадратическое отклонение двух независимых величин  $I_{РАБ}$  и  $I_{ПР}$  будет равно  $|\sigma|_{\Sigma} = 9,014 \text{ А}$ .

Нормативная вероятность возникновения пожара получается при вероятности  $P_n \geq 0,9 \cdot 10^{-6}$ .

Согласно справочным данным [8], такая вероятность может быть получена при значении нормированной случайной величины  $U \geq 4,76$ . Тогда из условия

$$U = \frac{(i-1)}{|\sigma|_{\Sigma}} \geq 4,76$$

можно определить среднее значение сварочного тока при разгерметизации:

$$\hat{I}_{ПР} \geq \hat{I}_{РАБ} + 4,76 |\sigma|_{\Sigma} = 198 \text{ А},$$

где  $\hat{I}_{РАБ} = 160 \text{ А}$ .

Из формулы для  $P_n$  (1) или по номограмме (рисунок 2) определяется время до разгерметизации нефтепровода с толщиной стенки 5 мм при определённом токе. Оно равно 7,5 с. Это значит, что в случае непрерывного воздействия электрической дугой на стенку нефтепровода с толщиной стенки на месте горения дуги 5,0 мм в течение 7,5 с при среднем сварочном токе  $\hat{I} = 155 \text{ А}$  возможна разгерметизация нефтепровода и возникновение пожароопасной ситуации с вероятностью  $1 \cdot 10^{-6}$ .

При точном соблюдении условий и параметров технологического процесса сварки на нефтепроводах без остановки перекачки (в частности с учётом ограничения времени непрерывного горения сварочной дуги) пожарная безопасность технологического процесса соответствует установленным нормам [1, 9-14].

Разгерметизация нефтепровода и возникновение пожара (инцидента) возможны только при производстве сварочных работ с нарушениями технологии сварки, в частности при небольшой (менее 2 мм) толщине стенки нефтепровода или при повышенном значении сварочного тока [3, 15].

Расчёт зависимости времени непрерывного горения сварочной дуги до разгерметизации нефтепровода от величины сварочного тока по формуле (1) даёт хорошую сходимость (~ 10 %) с экспериментом при сварочном токе свыше 200 А.

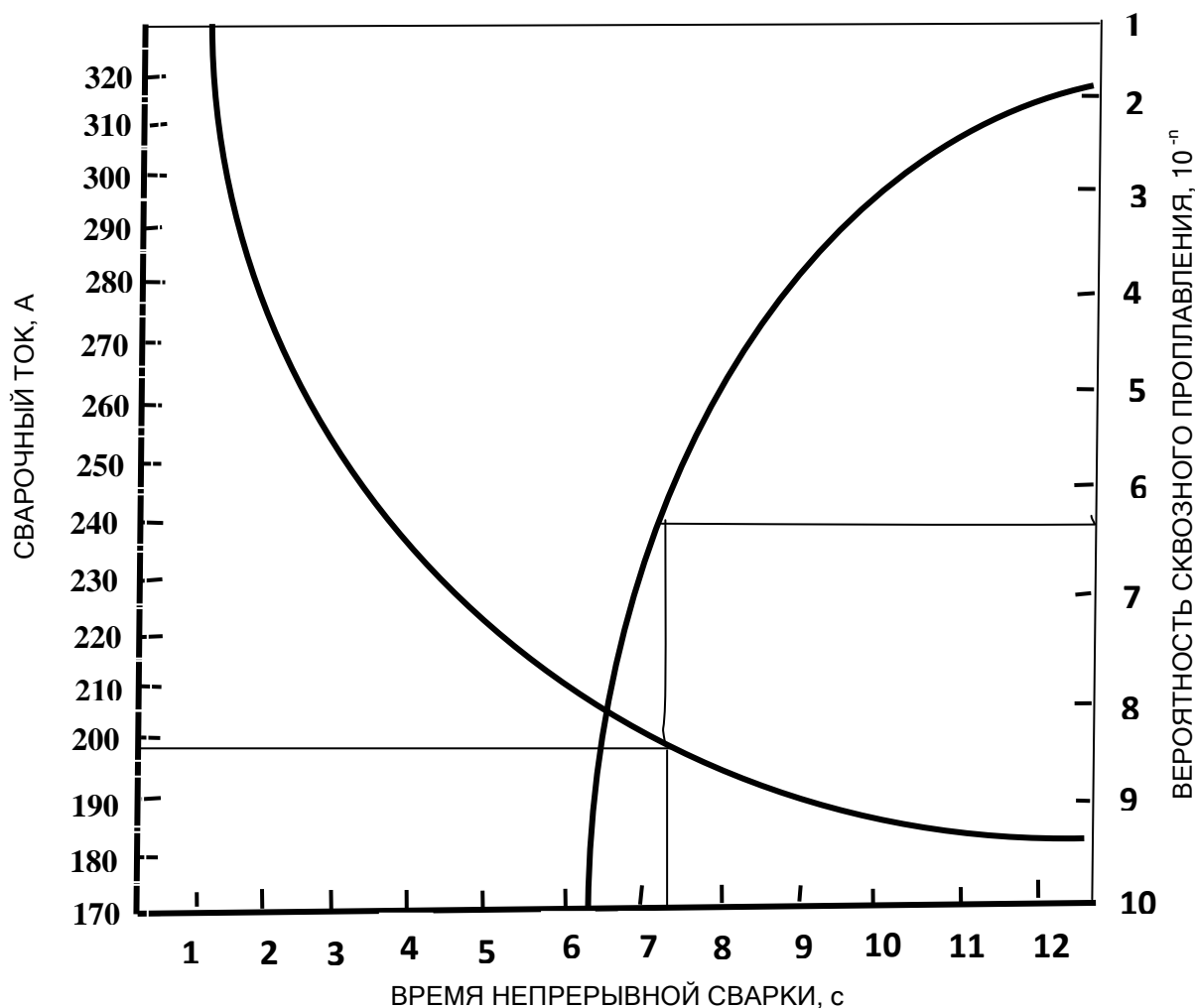
При меньших значениях сварочного тока в формуле (1) необходимо учитывать изменение толщины стенки вследствие наплавки металла. Расчёты по формуле (1) при наплавке дают результаты в сторону увеличения безопасности сварочных работ при ремонте нефтепроводов без остановки перекачки.

Безопасные параметры режима сварки можно получить по номограмме (рисунок 2).

Зная горизонтальную линию до пересечения с кривой зависимости тока от времени, на оси абсцисс можно определить время горения дуги. Проводится линия вдоль оси ординат до пересечения с кривой зависимости вероятности проплавления стенки трубопровода от времени горения дуги. На правой оси ординат находят вероятность проплавления.

### Выводы

Разработана и экспериментально проверена методика расчёта вероятности разгерметизации действующих нефтепроводов, находящихся под давлением в процессе сварки, что позволило доказать соответствие технологического процесса ведения сварочных работ на нефтепроводах без остановки перекачки требованиям нормативных документов на промышленную и пожарную безопасность.



**Рисунок 2.** Номограмма для определения вероятности сквозного проплавления стенки трубопровода и предельного сварочного тока от времени непрерывной сварки

**Список литературы**

1. Приказ Ростехнадзора РФ от 11.04.2016 № 144. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах. 2016. 36 с.
2. Собачкин А.С. Проблемы безопасности сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. Вып. 3 (113). С. 135-140.
3. Шор Я.В., Кузьмин Ф.И. Таблицы для анализа и контроля надёжности. М.: Советское радио, 1968. 288 с.
4. Собачкин А.С., Абсалямов Э.Р., Черданцев П.И. Определение допустимой толщины стенки трубопровода при проведении сварочных

**References**

1. *Prikaz Rostekhnadzora RF ot 11.04.2016 № 144. Metodicheskie osnovy po provedeniyu analiza opasnostei i otsenki riska avarii na opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh* [The Order of Rostekhnadzor of the Russian Federation from 11.04.2016 No. 144. Methodological Basis for Hazard Analysis and Accident Risk Assessment at Hazardous Production Facilities]. 2016. 36 p. [in Russian].
2. Sobachkin A.S. Problemy bezopasnosti svarochnykh работ na truboprovodakh, nakhodyashchikhsya pod davleniem perekachivaemykh sred [Safety of Welding Works on Pipelines under Transporting Medium Pressure]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i*

работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2012. Вып. 4. С. 48-50.

5. Методика расчёта допустимого давления во время сварки при проведении ремонтных работ на действующем нефтепроводе с проектным давлением 6,3 МПа и 10 МПа. М.: ОАО «АК «Транснефть», 2007. 194 с.

6. СТО Газпром-2006. Стандарт организации. Инструкция по технологии производства работ на газопроводе врезкой под давлением. 2006. 136 с.

7. Гумеров А.Г., Зайнуллин Р.С., Собакин А.С., Давлетшина Ф.А. Восстановление работоспособности нефтепроводов под давлением с применением сварки // ВНИИОЭНГ, Обзорная информация. М.: ВНИИОЭНГ, 1989. Вып. 8 (23). 64 с.

8. РД 23.040.00-КТН-073-15. Вырезка и врезка катушек, соединительных деталей, запорной и регулирующей арматуры. Подключение участков магистральных трубопроводов. М.: ОАО «АК «Транснефть», 2015. 123 с.

9. РД 39-00147105-015-98. Правила капитального ремонта магистральных нефтепроводов. Уфа, 1998. 194 с.

10. API Standart 1104 - Welding of Pipelines and Relating Facilities 19-th Edition. USA. 134 p.

11. Jens P. Tronskar, Ong Hock Guan, Rikard Tomqvist, William A. Bruce. «Live» Repair of Gas Pipeline with Deep Girth Weld Crack // Proceedings of ASME 2015, Pressure Vessel & Piping Conference ASME PVP. USA, 2015. P. 46-51.

12. Bruce W.F., Etheridge B.C. Further Development of Heat-Affected Zone Hardness Limits for In-Service Welding // Proceedings of IPC 2012, 9<sup>th</sup> International Pipeline Conference. Canada, 2015, pp. 34-36.

13. Raschke A. Technical Safety and Welding Simulation of Welding Work on High-Pressure Gas Pipelines in Operation // 14th Pipeline Technology Conference. Germany, 2019. pp. 47-49.

14. Blake M., Palfreuman I. Welding onto Lives Lines Influence of Internal Pressure during Welding and Preheat on pipe Wall Failure // British Gas Report, 1977. P. 83-91.

15. Bloem E. Cutting and Welding of Natural Gas Pipelines // Austral. 1987. No. 1. P. 22-23.

*nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2018, Issue 3 (113), pp. 135-140. [in Russian].

3. Shor Ya.V., Kuz'min F.I. *Tablitsy dlya analiza i kontrolya nadezhnosti* [Tables for Analysis and Reliability Control]. Moscow, Soviet radio, 1968. 288 p. [in Russian].

4. Sobachkin A.S., Absalyamov E.R., Cherdantsev P.I. *Opreделение dopustimoi tolshchiny stenki truboprovoda pri provedenii svarochnykh работ na trubopro-vodakh, nakhodyashchikhsya pod davleniem perekachivaemykh sred* [Determination of the Permissible Wall Thickness of the Pipeline during Welding on Pipelines under Pressure of Pumped Media]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodородного syr'ya – Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2012, Issue 4, pp. 48-50. [in Russian].

5. *Metodika rascheta dopustimogo davleniya vo vremya svarki pri provedenii remontnykh работ na deistvuyushchem nefteprovode s proektnym davleniem 6,3 MPa i 10 MPa. ОАО «АК «Transneft'»* [Method of Calculation of Permissible Pressure during Welding during Repair Works on the Operating Oil Pipeline with Design Pressure of 6.3 MPa and 10 MPa of Transneft, JSC]. 2007. 194 p. [in Russian].

6. *СТО Газпром-2006. Standart organizatsii. Instruktsiya po tekhnologii pro-izvodstva работ na gazoprovode vrezkoi pod davleniem* [STO Gazprom-2006. Standard of Organization. Instructions on Technology of Works on Gas Pipelines Tie-in under Pressure]. 2006. 136 p. [in Russian].

7. Gumerov A.G., Zainullin R.S., Sobachkin A.S., Davletshina F.A. *Vosstanovlenie работоспособности nefteprovodov pod davleniem s primeneniem svarki. [Restoration of Working Capacity of Oil Pipelines under Pressure]. VNIIOENG, obzornaya informatsiya – VNIIOENG Overview, Moscow, VNIIOENG, 1989. Issue 8 (23). 64 p. [in Russian].*

8. *RD 23.040.00-КТН-073-15. Vyrezka i vrezka katushek, soedinitel'nykh detalei, zapornoj i reguliruyushchei armatury. Podklyuchenie uchastkov magistral'nykh truboprovodov* [RD 23.040.00-КТН-073-15. Cutting and Insertion of Coils, Connecting Parts, Shut-Off and Control Valves. Connection of trunk Pipeline Sections]. Moscow, ОАО «АК «Транснефть», 2015. 123 с. [in Russian].

9. *RD 39-00147105-015-98. Pravila kapital'nogo remonta magistral'nykh nefteprovodov* [RD 39-00147105-015-98. Rules of Overhaul of oil Trunk Pipelines]. Ufa, 1998. 194 p. [in Russian].

10. *API Standart 1104 - Welding of Pipelines and Relating Facilities 19-th Edition*. USA. 134 p.

11. Jens P. Tronskar, Ong Hock Guan, Rikard Tomqvist, William A. Bruce. «Live» Repair of Gas Pipeline with Deep Girth Weld Crack. *Proceedings of ASME 2015, Pressure Vessel & Piping Conference ASME PVP*. USA, 2015. pp. 46-51.

12. Bruce W.F., Etheridge B.C. Further Development of Heat-Affected Zone Hardness Limits for In-Service Welding. *Proceedings of IPC 2012, 9<sup>th</sup> International Pipeline Conference*. Canada, 2015, pp. 34-36.

13. Raschke A. Technical Safety and Welding Simulation of Welding Work on High-Pressure Gas Pipelines in Operation. *14th Pipeline Technology Conference*. Germany, 2019. pp. 47-49.

14. Blake M., Palfreuman I. Welding onto Lives Lines Influence of Internal Pressure during Welding and Preheat on Pipe Wall Failure. *British Gas Report*, 1977, pp. 83-91.

15. Bloem E. Cutting and Welding of Natural Gas Pipelines. *Austral.*, 1987, No. 1, pp. 22-23.

**Автор**

• Собачкин Александр Сергеевич, канд. техн. наук  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
Доцент кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,  
ул. Космонавтов, 1  
e-mail: acc1955@mail.ru

**The Author**

• Sobachkin Aleksandr S., Candidate of Engineering Sciences  
Ufa State Petroleum Technological University  
Assistant Professor of Construction and Maintenance of Oil and Gas Pipelines and Storages Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: acc1955@mail.ru