

УДК 621.315

С.В. Харин, А.Г. ЩербининПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕЗИСТИВНОГО
НАГРЕВА ТРУБОПРОВОДОВ**

Одним из способов обогрева трубопроводов в нефтегазовой отрасли является система резистивного нагрева, основным элементом которой является нагревательный (греющий) кабель. В данной работе рассматривается плоский трехжильный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена, поливинилхлоридной внутренней оболочкой, металлического экрана в виде оплетки и с внешней поливинилхлоридной оболочкой. Трубопровод покрыт слоем тепловой изоляции для снижения тепловых потерь в окружающее пространство. Входными параметрами для расчета систем резистивного нагрева трубопроводов являются геометрические размеры теплоизолированного трубопровода, теплофизические параметры тепловой изоляции, конструкция греющего кабеля, поддерживаемая температура трубопровода и условия теплообмена с окружающей средой. На первом этапе вычисляются тепловые потери теплоизолированного трубопровода в окружающее пространство, с учетом которых на втором этапе определяются температурные режимы работы греющего кабеля. Тепловые потери системы резистивного нагрева трубопроводов находятся с использованием тепловой схемы замещения и теории подобия тепловых процессов. Для определения температурных режимов работы греющего кабеля предлагается математическая модель стационарной теплопроводности, численная реализация которой осуществляется методом конечных объемов в среде инженерных расчетов Ansys Fluent. Проводится исследование влияния температуры окружающей среды, скорости ветра, толщины тепловой изоляции трубопровода на величину тепловых потерь в окружающее пространство. Для рассматриваемых условий теплообмена с окружающей средой строятся температурные поля системы резистивного нагрева трубопроводов с нагревательным кабелем. По результатам численных исследований производится оценка возможности использования рассматриваемого кабеля для обогрева трубопровода для заданных условий теплообмена с окружающей средой.

Ключевые слова: трубопровод, нагревательный кабель, система резистивного нагрева, математическая модель, тепловая схема замещения.

S.V. Kharin, A.G. Shcherbinin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**RESEARCH OF PROCESSES RESISTIVE
HEATING OF PIPELINES**

One of the ways of heating pipelines in the oil and gas industry is a system of resistive heating, the main element of which is the heating (heating) cable. In this paper, we consider a flat three-core cable with insulation of cross-linked polyethylene, PVC inner shell, metal screen in the form of braid and the outer polyvinyl chloride shell. The pipeline is covered with a layer of thermal insulation to reduce

heat loss to the surrounding area. The input parameters for the calculation of pipeline resistive heating systems are the geometric dimensions of the insulated pipeline, thermal parameters of thermal insulation, the design of the heating cable, the maintained temperature of the pipeline and the conditions of heat exchange with the environment. At the first stage, the thermal losses of the heat-insulated pipeline to the surrounding space are calculated, taking into account which the temperature modes of the heating cable are determined at the second stage. Thermal losses of the system of resistive heating of pipelines are found using the thermal equivalent circuit and the theory of similarity of thermal processes. To determine the temperature conditions of the heating cable, a mathematical model of stationary thermal conductivity is proposed, the numerical implementation of which is carried out by the finite volume method in the engineering calculations Ansys Fluent. The influence of ambient temperature, wind speed, thickness of thermal insulation of the pipeline on the amount of heat losses in the surrounding space is studied. For the considered conditions of heat exchange with the environment, the temperature fields of the system of resistive heating of pipelines with a heating cable are constructed. According to the results of numerical studies, the possibility of using the considered cable for heating the pipeline for the given conditions of heat exchange with the environment is estimated.

Keywords: pipeline, heating cable, resistive heating system, mathematical model, thermal equivalent circuit.

Развитие добычи, транспортировки и переработки нефти и нефтепродуктов выявило проблему необходимости подогрева трубопроводов, резервуаров и других объектов. В настоящее время электрообогрев трубопроводов, как правило, осуществляется с помощью резистивных и индукционно-резистивных систем [1–7]. В качестве резистивных систем широкое распространение получили нагревательные кабели. Нагревательные кабели – специфический вид кабельных изделий, преобразующих электрическую энергию в тепловую в целях нагрева и выполняющих функцию приемника электрической энергии, а не передающей линии. Нагревательные кабели значительно отличаются от обычных кабелей и проводов, назначение которых – передавать электрическую энергию с наименьшими потерями и с незначительным падением напряжения по длине линии (обычно не более 5 %) [1, 8–10].

В данной работе рассматривается процесс резистивного нагрева стального трубопровода диаметром 200 мм, покрытого тепловой изоляцией с помощью плоского трехжильного кабеля (рис. 1). На рис. 1: 1 – греющий кабель (рис. 2); 2 – стальной трубопровод; 3 – тепловая изоляция; 4 – транспортируемая по трубопроводу жидкость. Сечение одной медной многопроволочной токопроводящей жилы (ТПЖ) составляет 6 мм² (рис. 2).

Входными параметрами для расчета систем резистивного нагрева трубопроводов являются геометрические размеры теплоизолированного трубопровода, теплофизические параметры тепловой изоляции, конструкция греющего кабеля, поддерживаемая температура трубопровода и условия теплообмена с окружающей средой. На первом этапе вы-

числяются тепловые потери теплоизолированного трубопровода в окружающее пространство, с учетом которых на втором этапе определяются температурные режимы работы греющего кабеля. Необходимо отметить, что длительно допустимая температура для изоляции из сшитого полиэтилена не должна превышать 90 °С, а конструктивных элементов, изготовленных из ПВХ-пластиката, – 70 °С.

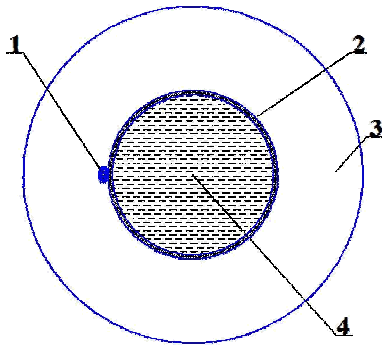


Рис. 1. Схема системы резистивного нагрева трубопровода

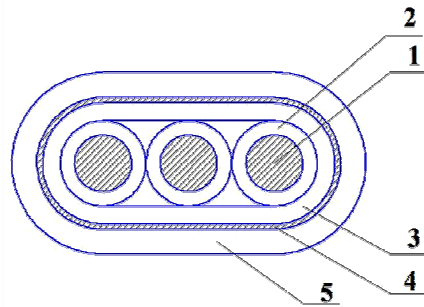


Рис. 2. Конструкция кабеля:
1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция из сшитого полиэтилена; 3 – внутренняя оболочка; 4 – металлический экран; 5 – внешняя оболочка из ПВХ-пластиката

Для нахождения тепловых потерь система резистивного нагрева трубопроводов рассматривается как осесимметричная. На рис. 3 представлена тепловая схема замещения данной системы, для которой тепловые потери определяются по формуле [11–13]:

$$P_{\Pi} = \frac{t_{\text{Тр}} - t_0}{S_{\text{Из}} + S_0}, \quad (1)$$

где $t_{\text{Тр}}$ – температура поверхности трубы; t_0 – температура окружающей среды; P_{Π} – удельная мощность тепловых потерь; $S_{\text{Из}}$ – тепловое сопротивление изоляционного покрытия; S_0 – тепловое сопротивление окружающей среды.

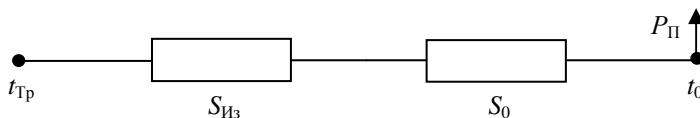


Рис. 3. Тепловая схема замещения

Тепловое сопротивление изоляции вычисляется по формуле [11–15]:

$$S_{\text{из}} = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_{\text{из}}\pi} \ln(r_{\text{из}}/r_{\text{тр}})}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности тепловой изоляции; $r_{\text{из}}$ – радиус по поверхности изоляционного покрытия; $r_{\text{тр}}$ – радиус трубопровода.

Тепловое сопротивление окружающей среды определяется следующим образом [11–15]:

$$S_0 = \frac{1}{2\pi r_{\text{из}} \alpha}, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, который находится из теории подобия тепловых процессов по формуле [11–15]

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda_{\text{в}}}{d}, \quad (4)$$

где Nu – число Нуссельта, определяемое по критериальным уравнениям теории теплопередачи [11–15]; $d = 2r_{\text{из}}$; $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха.

Исходные данные для определения тепловых потерь:

- температура трубопровода равняется 10 °С;
- температуры окружающей среды варьируется от –30 до –50 °С;
- скорость ветра изменяется от 5 до 30 м/с;
- толщина изоляции принимается равной 50, 75, 100 мм;
- коэффициент теплопроводности тепловой изоляции равняется 0,038 Вт/(м·°С).

Результаты вычисления тепловых потерь для заданных условий представлены в табл. 1–3. Из таблиц видно, что изменение скорости ветра несущественно влияет на величину тепловых потерь при прочих одинаковых условиях. Это обусловлено тем, что тепловое сопротивление изоляции более чем в десять раз превышает тепловое сопротивление теплоотдачи. При этом тепловые потери прямо пропорционально увеличиваются с ростом теплового напора $t_{\text{тр}} - t_0$.

Таблица 1

Значение мощности тепловых потерь в окружающее пространство для толщины изоляции, равной 50 мм

$P_{\text{п}}, \text{Вт/м}$		Скорость ветра, м/с					
		5	10	15	20	25	30
$t_0, ^\circ\text{C}$	-30	22,91	23,13	23,22	23,27	23,31	23,33
	-35	25,78	26,02	26,12	26,18	26,22	26,25
	-40	28,65	28,91	29,02	29,09	29,13	29,17
	-45	31,52	31,81	31,93	32,00	32,05	32,08
	-50	34,39	34,70	34,84	34,91	34,97	35,00

Таблица 2

Значение мощности тепловых потерь в окружающее пространство для толщины изоляции, равной 75 мм

$P_{\text{п}}, \text{Вт/м}$		Скорость ветра, м/с					
		5	10	15	20	25	30
$t_0, ^\circ\text{C}$	-30	16,76	16,86	16,90	16,93	16,95	16,96
	-35	18,85	18,97	19,02	19,05	19,07	19,08
	-40	20,95	21,08	21,13	21,16	21,18	21,20
	-45	23,04	23,19	23,25	23,28	23,30	23,32
	-50	25,14	25,30	25,36	25,40	25,42	25,44

Таблица 3

Значение мощности тепловых потерь в окружающее пространство для толщины изоляции, равной 100 мм

$P_{\text{п}}, \text{Вт/м}$		Скорость ветра, м/с					
		5	10	15	20	25	30
$t_0, ^\circ\text{C}$	-30	13,59	13,65	13,68	13,70	13,71	13,71
	-35	15,29	15,36	15,39	15,41	15,42	15,43
	-40	16,99	17,07	17,10	17,12	17,13	17,14
	-45	18,69	18,78	18,81	18,83	18,85	18,86
	-50	20,39	20,48	20,52	20,55	20,56	20,57

На рис. 4 приведен график зависимости мощности тепловых потерь от толщины тепловой изоляции, построенный при температуре окружающей среды, равной -50°C , и скорости ветра – 30 м/с. На рис. 4

толщина тепловой изоляции обозначается как $\Delta_{из}$. Из рисунка видно, что при увеличении толщины изоляции в 2 раза тепловые потери снижаются в 1,7 раза.

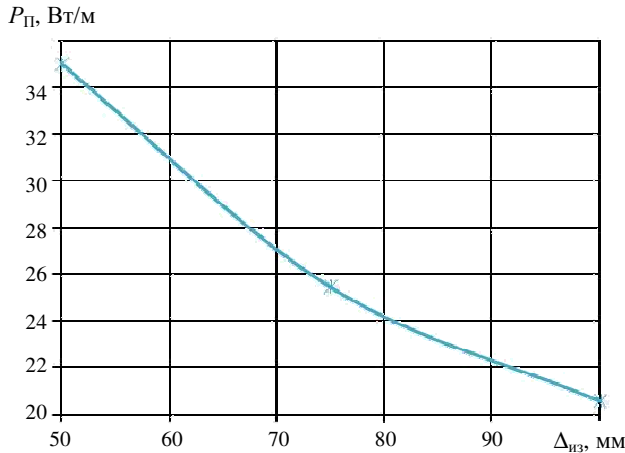


Рис. 4. Зависимость мощности тепловых потерь от толщины тепловой изоляции

Температурные режимы работы греющего кабеля и его токовая нагрузка определяются из решения задачи теплопроводности с учетом полученных значений тепловых потерь. Для этого принимаются следующие допущения: процесс стационарный; градиент температуры вдоль трубопровода равен нулю; теплофизические параметры не зависят от температуры. С учетом сделанных допущений дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности имеет вид [14–15]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q_V = 0, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; t – температура; q_V – объемная мощность внутреннего источника тепла.

Мощность P_K , выделяемая греющим кабелем, должна перекрывать потери тепла с поверхности тепловой изоляции $P_{П}$. Поэтому принимаем, что $P_K = P_{П}$. Тогда объемная мощность внутреннего источника тепла в греющем кабеле определяется по формуле [11–13]:

$$q_V = \frac{P_K}{3S_{ПЖ}}, \quad (6)$$

где P_K – удельная мощность греющего кабеля, Вт/м; $S_{\text{ТПЖ}}$ – сечение одной токопроводящей жилы, м².

Дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности дополняется граничными условиями [14–15]:

– на внешней поверхности трубы $t_{\text{Тр}} = 10^\circ\text{C}$;

– на внешней поверхности тепловой изоляции $-\frac{\partial t}{\partial n} = -\frac{\alpha}{\lambda}(t_{\text{ИЗ}} - t_0)$;

– на границах раздела сред задается граничное условие четвертого рода:

$$\lambda_i \left(\frac{\partial t_i}{\partial n} \right) = \lambda_{i+1} \left(\frac{\partial t_{i+1}}{\partial n} \right).$$

$$t_i = t_{i+1}$$

где $t_{\text{ИЗ}}$ – температура поверхности тепловой изоляции; i – номер соответствующей среды.

Ток определяется по формуле [11–13]

$$I = \sqrt{\frac{P_K}{3R}}, \tag{7}$$

где $R = \frac{\rho_{20}}{S_{\text{ТПЖ}}} [1 + \alpha_T (t_{\text{ж}} - 20)]$; ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м; α_T – температурный коэффициент электрического сопротивления, 1/°С; $t_{\text{ж}}$ – температура токопроводящей жилы.

Значение электрического удельного сопротивления и температурного коэффициента меди приведено в табл. 4.

Таблица 4

Электрическое удельное сопротивление и температурный коэффициент меди [11, 12]

Материал	Удельное сопротивление при 20 °С (ρ_{20}), Ом·м	Температурный коэффициент при 20 °С (α_T), 1/°С
Медь	$1,7241 \cdot 10^{-8}$	$3,93 \cdot 10^{-3}$

Поставленная задача решается методом конечных элементов в программном комплексе Ansys Fluent [16–21].

На рис. 5 приведено температурное поле в тепловой изоляции трубопровода с греющим кабелем при толщине изоляции, равной 100 мм, температуре окружающей среды, равной $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, и скорости ветра 30 м/с. А на рис. 6 построено температурное поле в самом греющем кабеле при тех же условиях.

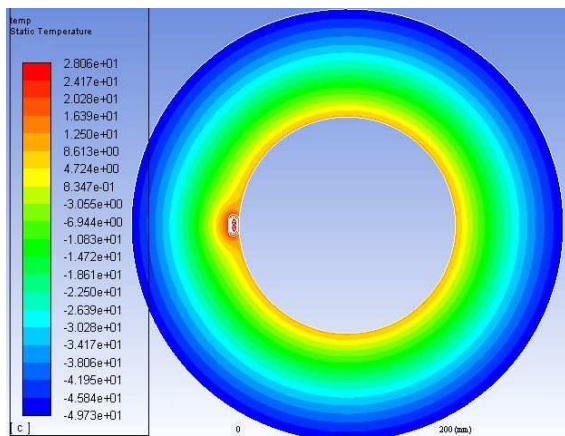


Рис. 5. Температурное поле изолированного трубопровода

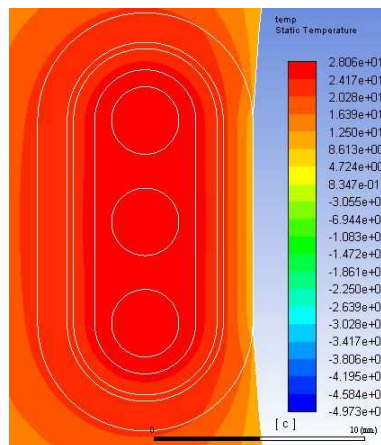


Рис. 6. Температурное поле в греющем кабеле

Из рис. 5 и 6 видно, что максимальная температура изоляции кабеля равняется $28,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ при допустимой $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальная температура внутренней оболочки составляет $24,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ при допустимой $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Из этого можно сделать вывод, что греющей кабель работает в допустимом режиме, обеспечивая заданную температуру трубопровода.

В табл. 5–7 приведены значения максимальных температур для рассматриваемых условий теплообмена с окружающей средой и заданных толщин тепловой изоляции.

Из таблиц видно, что наибольшая температура в кабеле наблюдается для варианта с толщиной тепловой изоляции трубопровода 50 мм, температурой окружающей среды $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра 30 м/с, т.е. для варианта с максимальными тепловыми потерями.

Для всех рассматриваемых вариантов работы системы резистивного нагрева трубопровода температура элементов греющего кабеля не превышает допустимых значений.

Таблица 5

Значения температуры ТПЖ при толщине изоляции 50 мм

$T_{\text{ТПЖ}}, ^\circ\text{C}$		Скорость ветра, м/с					
		5	10	15	20	25	30
$t_0, ^\circ\text{C}$	-30	30,0	30,0	30,3	30,3	30,4	30,4
	-35	32,5	32,7	32,8	32,9	32,9	32,9
	-40	35,0	35,3	35,4	35,4	35,4	35,5
	-45	37,5	37,8	37,9	38,0	38,0	38,0
	-50	40,0	40,3	40,4	40,5	40,5	40,6

Таблица 6

Значения температуры ТПЖ при толщине изоляции 75 мм

$T_{\text{ТПЖ}}, ^\circ\text{C}$		Скорость ветра, м/с					
		5	10	15	20	25	30
$t_0, ^\circ\text{C}$	-30	24,7	24,8	24,8	24,8	24,9	24,9
	-35	26,5	26,6	26,7	26,7	26,7	26,7
	-40	28,4	28,5	28,5	28,6	28,6	28,6
	-45	30,2	30,3	30,4	30,4	30,4	30,5
	-50	32,1	32,2	32,2	32,3	32,3	32,3

Таблица 7

Значения температуры ТПЖ при толщине изоляции 100 мм

$T_{\text{ТПЖ}}, ^\circ\text{C}$		Скорость ветра, м/с					
		5	10	15	20	25	30
$t_0, ^\circ\text{C}$	-30	22,0	22,0	22,0	22,0	22,1	22,1
	-35	23,4	23,5	23,5	23,5	23,6	23,6
	-40	24,9	25,0	25,0	25,1	25,1	25,1
	-45	26,4	26,5	26,5	26,6	26,6	26,6
	-50	27,9	28,0	28,0	28,1	28,1	28,1

Выводы. В данной работе предложена методика расчета системы резистивного нагрева трубопровода, которая включает в себя два этапа. На первом этапе определяются тепловые потери с поверхности теплоизолированного трубопровода, а на втором этапе в результате решения задачи стационарной теплопроводности определяется температурное поле в тепловой изоляции и греющем кабеле, по которому производится оценка возможности использования данного кабеля для обогрева трубопровода. Таким образом, предложенная методика может

быть использована при разработке систем резистивного обогрева трубопроводов в нефтегазовой отрасли, подборе греющих кабелей и определении температурных режимов их работы.

Библиографический список

1. Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. – М.: Инфра-Инженерия, 2015. – 272 с.
2. Транспорт и хранение высоковязких нефтей и нефтепродуктов. Применение электроподогрева / Р.Н. Бахтизин., А.К. Галлямов, Б.Н. Мастобаев [и др.]. – М.: Химия. 2004. – 196 с.
3. Струпинский М.Л., Кувалдин А.Б. Индукционно-резистивная система обогрева трубопровода // Электрика. – 2008. – № 11. – С. 21–24.
4. Mende J., Pohl G. Induktive Beheizung von Rohrleitungen // Lebensmittel-Ind. – 1968. – 15, № 1. – P. 11–13.
5. Расчет и внедрение индукционно-резистивной системы обогрева трубопроводов / А.Б. Кувалдин, М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков, М.А. Федин // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2011. – Екатеринбург, 2011. – С. 55–60.
6. Электротепловая модель коаксиальной индукционно-резистивной системы нагрева / А.Б. Кувалдин., М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков, В.А. Шатов // Электротехника. – 2005. – № 1. – С. 48–53.
7. Хренков Н.Н., Дегтярева Е.О. Расчет режимов остывания и разогрева трубопроводов // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – 2011. – № 2. – С. 20–23.
8. Струпинский М.Л. Саморегулирующиеся кабели отечественного производства – ключевой элемент систем электрообогрева в нефтегазовом комплексе // Кабели и провода. – 2017. – 3(364). – С. 3–9.
9. Макиенко Г.П. Кабели и провода, применяемые в нефтегазовой индустрии. – Пермь: Стиль-МГ, 2004. – 560 с.
10. Нагревательные кабели и электроподогрев скважин // Бурение и нефть / Л.А. Ковригин, Г.П. Макиенко, И.М. Акмалов, С.М. Пешин. – 2004. – № 3. – С. 22–25.
11. Основы кабельной техники / под ред. В.А. Привезенцева. – М.: Энергия, 1975. – 472 с.
12. Основы кабельной техники / под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Академия, 2006. – 427 с.

13. Ковригин Л.А. Основы кабельной техники. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 94 с.
14. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 2010. – 343 с.
15. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
16. Бате К.-Ю. Методы конечных элементов. – М.: Физматлит, 2010. – 1022 с.
17. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 895 с.
18. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1979. – 541 с.
19. Зенкевич О.С., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
20. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
21. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справоч. пособие. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.

References

1. Strupinskii M.L., Khrenkov N.N., Kuvaldin A.B. Proektirovanie i ekspluatatsiia sistem elektricheskogo obogreva v neftegazovoi otrasli [Design and operation of electric heating systems in the oil and gas industry]. Moscow: Infra-Inzheneriia, 2015. 272 p.
2. Bakhtizin R.N., Galliamov A.K., Mastobaev B.N. et al. Transport i khranenie vysokoviazkikh neftei i nefteproduktov. Primenenie elektropodogreva [Transportation and storage of high-viscosity oils and oil products. Application of electric heating]. Moscow: Khimiia. 2004. 196 p.
3. Strupinskii M.L., Kuvaldin A.B. Induktsionno-rezistivnaia sistema obogreva truboprovoda [Induction-resistive heating system of the pipeline]. *Elektrika*, 2008, no. 11, pp. 21-24.
4. Mende J., Pohl G. Induktive Beheizung von Rohrleitungen. *Lebensmittel-Ind*, 1968, 15, no. 1, pp. 11-13.
5. Kuvaldin A.B., Strupinskii M.L., Khrenkov N.N., Fedin M.A. Raschet i vnedrenie induktsionno-rezistivnoi sistemy obogreva truboprovodov [Calculation and implementation of induction-resistive heat-

ing system of pipelines]. *Aktual'nye problemy energosberegaiushchikh elektrotekhnologii APEET-2011*. Ekaterinburg, 2011, pp. 55-60.

6. Kuvaldin A.B., Strupinskii M.L., Khrenkov N.N., Shatov V.A. Elektroteplovaia model' koaksial'noi induktsionno-rezistivnoi sistemy nagreva [Electrothermal model of coaxial induction-resistive heating system]. *Elektrotekhnika*, 2005, no. 1, pp. 48-53.

7. Khrenkov N.N., Degtiareva E.O. Raschet rezhimov ostyvaniia i razogreva truboprovodov [Calculation of cooling and heating modes of pipelines]. *Promyshlennii elektroobogrev i elektrootoplenie*, 2011, no. 2, pp. 20-23.

8. Strupinskii M.L. Samoreguliruiushchiesia kabeli otechestvennogo proizvodstva – kliuchevoi element sistem elektroobogreva v neftegazovom komplekse [Self-regulating cables of domestic production a key element of electric heating systems in the oil and gas industry]. *Kabeli i provoda*, 2017, 3(364), pp. 3-9.

9. Makienko G.P. Kabeli i provoda, primeniaemye v neftegazovoi industrii [Cables and wires used in the oil and gas industry]. Perm': Stil'-MG, 2004. 560 p.

10. Kovrigin L.A., Makienko G.P., Akmalov I.M., Peshin S.M. Nagrevatel'nye kabeli i elektropodogrev skvazhin [Heating cables and electric heating of wells]. *Burenie i neft'*, 2004, no 3, pp. 22-25.

11. Osnovy kabel'noi tekhniki [Basics of cable technology]. Ed. V.A. Privezentseva. Moscow: Energiia, 1975. 472 p.

12. Osnovy kabel'noi tekhniki [Basics of cable technology]. Ed. I.B. Peshkova. Moscow: Академия, 2006. 427 p.

13. Kovrigin L.A. Osnovy kabel'noi tekhniki [Basics of cable technology]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2006. 94 p.

14. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Osnovy teploperedachi [Heat transfer basics]. Moscow: Energiia, 2010. 343 p.

15. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha [Heat transfer]. Moscow: Energoizdat, 1981. 416 p.

16. Bate K.-Iu. Metody konechnykh elementov [Finite element methods]. Moscow: Fizmatlit, 2010. 1022 p.

17. Soloveichik Iu.G., Roiak M.E., Persova M.G. Metod konechnykh elementov dlia resheniia skaliarnykh i vektornykh zadach [Finite element method for solving scalar and vector problems]. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007. 895 p.

18. Zenkevich O.S. Metod konechnykh elementov v tekhnike [Finite element method in engineering]. Moscow: Mir, 1979. 541 p.

19. Zenkevich O.S., Morgan K. Konechnye elementy i approksimatsiia [Finite elements and approximation]. Moscow: Mir, 1986. 318 p.

20. Segerlind L. Primenenie metoda konechnykh elementov [Application of the finite element method]. Moscow: Mir, 1979. 392 p.

21. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smaliuk A.F. ANSYS dlia inzhenerov: spravochnoe posobie [ANSYS for engineers]. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 512 p.

Сведения об авторах

Харин Станислав Валерьевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: stas.xar@yandex.ru).

Щербинин Алексей Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29 e-mail: agshch@mail.ru).

About the authors

Kharin Stanislav Valer'evich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: stas.xar@yandex.ru).

Shcherbinin Aleksei Grigor'evich (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Science, Professor Department of “Designing and technology in electrical equipment” Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: agshch@mail.ru).

Получено 30.10.2019