

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК [531.8+536.248.1]

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА В СКВАЖИНАХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ КРИОЛИТЗОНЫ

### MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMOELECTRIC DEVICES OPERATION IN WELLS DURING DEVELOPMENT OF OIL AND GAS FIELDS IN THE PERMAFROST AREAS

**Павлова Прасковья Леонидовна<sup>1</sup>,**

ассистент, e-mail: praskovya2611@yandex.ru

**Pavlova Praskovya L.<sup>1</sup>,** postgraduate student

**Кондрашов Пётр Михайлович<sup>1</sup>,**

кандидат техн. наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: pkondrashov@sfsu-kras.ru

**Kondrashov Petr M.<sup>1</sup>,** C. Sc., Associate Professor, Head of the Department

**Зеньков Игорь Владимирович<sup>1,2</sup>,**

доктор техн. наук, старший научн. сотрудник, e-mail: zenkoviv@mail.ru

**Zenkov Igor V.<sup>1,2</sup>,** Dr. Sc., Senior researcher

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>1</sup>Siberian Federal University, 79 Svobodny Prospect Krasnoyarsk 660041 Russia

<sup>2</sup> Институт вычислительных технологий СО РАН. Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» КНЦ СО РАН, 660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, 53

<sup>2</sup>Special Design and Technological Bureau "Nauka" KSC SB RAS, 53 Mira Prospect Krasnoyarsk 660049 Russia

**Аннотация.** В данной статье представлены основы математической модели распределения температуры при установке термоэлектрического устройства на внешней стенки нефтегазовой скважины, работа которого базируется на термоэлектрическом эффекте Пельтье. Практическое использование модели позволяет оценить текущую температуру мерзлой породы в зависимости от конструктивных параметров скважины, скважинного термоэлектрического устройства и температуры фазового превращения мерзлой породы, а также позволяет строить графики этих зависимостей в реальных диапазонах. Скважинное термоэлектрическое устройство предназначено для снижения теплового воздействия нефтегазовой скважины на вечномерзлые горные породы в ходе ее строительства или при эксплуатации в климатических условиях Арктических территорий.

**Abstract.** This article presents the foundation of the temperature distribution mathematical model when the thermoelectric devices are installed on external walls of oil and gas wells, the operation of which is based on thermoelectric Peltier effect. The model practical use allows to estimate the current temperature of permafrost depending on design parameters of the well, downhole thermoelectric devices, and the temperature of frozen rocks phase transformation, and also allows you to build graphs of these dependencies in real ranges. Downhole thermoelectric device is designed to reduce the thermal impact of oil and gas wells in permafrost rocks during their construction and operation in the climatic conditions of the Arctic territories.

**Ключевые слова:** многолетнемёрзлая порода, скважина, математическая модель, скважинное термоэлектрическое устройство, термоэлектрический модуль, эффект Пельтье.

**Keywords:** permafrost, frozen rock, well, mathematical model, downhole thermoelectric device, thermoelectric module, Peltier effect.

Оттаивание многолетнемёрзлых пород во время строительства и эксплуатации нефтегазовых скважин часто приводит к техногенным авариям и осложнениям. Исходя из жизненного цикла скважины, с целью остановки процесса растепления

мерзлых пород, наряду с технологическими мерами, используют различные виды термозащитного оборудования [3]. Мы предлагаем технологическое оборудование, работа которого направлена на снижение температуры внешней стенки скважи-

ны, при использовании локально расположенного охлаждающего термоэлектрического устройства, основанного на эффекте Пельтье с функцией распределения температуры вдоль поверхности труб [6]. Процесс распределения температуры на поверхности теплопроводных материалов, например труб при установке на их поверхности локально расположенного термоэлектрического элемента недостаточно изучен, и как мы считаем, из-за этого термоэлектрические устройства широко не используются в тех областях, где можно было использовать давно известный в инженерном деле физический эффект. Поэтому необходимо для инженерных расчетов разработать математическую модель с использованием аналитических формул для расчета распределения температуры вдоль поверхности материала необходимой точности.

В статье предложена математическая модель процесса распределения температуры при установке термоэлектрического устройства в нефтяной скважине, обустроенной в толще многоглетнemerзлых пород. Нефтяная скважина включает подъемную трубу, эксплуатационную, промежуточные колонны, кондуктор и термоизолированное направление. Расчетная схема определения температуры на наружной поверхности термоизолированного направления показана на рис. 1. Температура на наружной поверхности труб в цилиндрической системе координат [1, 2]:

$$t_{cm,n} = t_{\infty} - q_{c_{\text{кв}}} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{\infty}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right), \quad (1)$$

где  $t_{\infty}$  – температура флюида в скважине,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$q_{c_{\text{кв}}}$  – линейный тепловой поток скважины, движущийся внутри подъемных труб,  $\text{Вт}/\text{м}$ ;

$\alpha_{\infty}$  – коэффициент теплоотдачи от флюида к стенке подъемных труб,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности слоев конструкции скважины (подъемных труб, жидкости, эксплуатационной, промежуточных колонн, кондуктора, термоизолирующего направления, цементного кольца),  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$d_{i+1}, d_i$  – диаметры слоев конструкции скважины, м.

Рассмотрим расчёт температуры на наружной поверхности термоизолированного направления с принятыми величинами параметров слоев конструкции скважины (табл. 1).

Текущую температуру мерзлых пород в зависимости от температуры скважины можно определить из соотношения

$$t_{ep.tek} = t_{\phi} + t_{cm,n} (q_{c_{\text{кв}}}, t_{\infty}, \alpha_{\infty}, \lambda_i, d_i), \quad (2)$$

- для незасоленных песчаных и крупнообломочных грунтов значение принимается по ГОСТ

где  $t_{\phi}$  – температура фазовых превращений мерзлого грунта,  $^{\circ}\text{C}$ .

Температуры слоев конструкции скважины, вычисленные по формуле (1), представлены в виде табл. 2.

Для расчета текущей температуры мерзлых пород необходимо определить температуру фазовых переходов или температуру начала замерзания грунта, которая характеризует переход поровой воды в лед, либо льда в воду.

Фазовый переход дистиллированной воды принято считать равным  $0 \ ^{\circ}\text{C}$ , но наличие минеральных солей и разнообразное состояние мерзлых пород снижает данное значение. Для расчета температуры начала замерзания мерзлых грунтов рекомендуется воспользоваться следующими правилами:

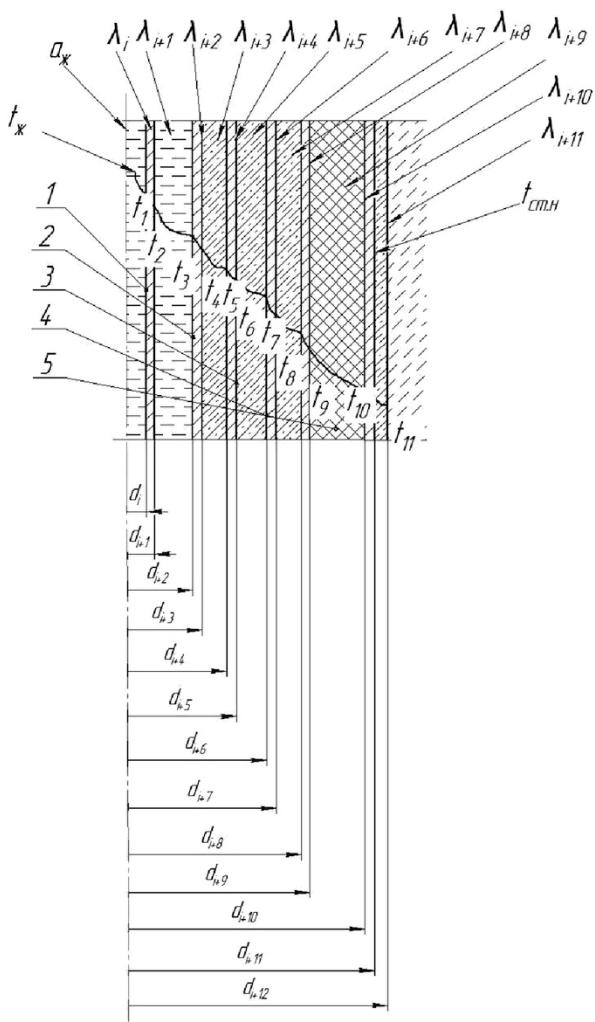


Рис. 1 – Расчетная схема определения температуры на наружной поверхности термоизолированного направления

- 1 – подъемная труба; 2 – эксплуатационная колонна;
- 3 – промежуточная колонна;
- 4 – кондуктор; 5 – термоизолированное направление 25100-82 равным  $0 \ ^{\circ}\text{C}$  [5];

Таблица 1 – Величины параметров слоев конструкции скважины

Обозначение	Название	Единица измерения	Величина
$q_{\text{скв}}$	Линейный тепловой поток скважины, движущийся внутри подъемных труб	Вт/м	17,04
$d_i$	Внутренний диаметр подъемной трубы	мм	76
$d_{i+1}$	Наружный диаметр подъемной трубы	мм	89
$d_{i+2}$	Внутренний диаметр эксплуатационной колонны	мм	179
$d_{i+3}$	Наружный диаметр эксплуатационной колонны	мм	159
$d_{i+4}$	Внутренний диаметр промежуточной колонны	мм	225
$d_{i+5}$	Наружный диаметр промежуточной колонны	мм	245
$d_{i+6}$	Внутренний диаметр кондуктора	мм	304
$d_{i+7}$	Наружный диаметр кондуктора	мм	324
$d_{i+8}$	Внутренний диаметр внутренней трубы термоизолирующего направления	мм	510
$d_{i+9}$	Наружный диаметр внутренней трубы термоизолирующего направления	мм	530
$d_{i+10}$	Внутренний диаметр наружной трубы термоизолирующего направления	мм	860
$d_{i+11}$	Наружный диаметр наружной трубы термоизолирующего направления	мм	880
$d_{i+12}$	Наружный диаметр цементного кольца	мм	1100
$t_{\text{жк}}$	Температура флюида	°C	42
$\alpha_{\text{жк}}$	Коэффициент теплоотдачи флюида	Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)	900
$\lambda_i$	Коэффициент теплопроводности подъемной трубы	Вт/м·°C	52
$\lambda_{i+1}$	Коэффициент теплопроводности среды в межтрубном пространстве подъемной трубы и эксплуатационной колонны	Вт/м·°C	0,52
$\lambda_{i+2}$	Коэффициент теплопроводности эксплуатационной колонны	Вт/м·°C	52
$\lambda_{i+3}, \lambda_{i+5}, \lambda_{i+7}, \lambda_{i+11}$	Коэффициент теплопроводности цементного кольца	Вт/м·°C	1,95
$\lambda_{i+4}$	Коэффициент теплопроводности Промежуточной колонны	Вт/м·°C	52
$\lambda_{i+6}$	Коэффициент теплопроводности кондуктора	Вт/м·°C	52
$\lambda_{i+8}$	Коэффициент теплопроводности внутренней трубы термоизолирующего направления	Вт/м·°C	52
$\lambda_{i+9}$	Коэффициент теплопроводности материала теплоизоляции	Вт/м·°C	0,03
$\lambda_{i+10}$	Коэффициент теплопроводности наружной трубы термоизолирующего направления	Вт/м·°C	52

Таблица 2 – Значения температур слоев конструкции скважины, °С

Температура	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{cm.h}$	$t_{11}$
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	----------	------------	----------

Величина	41,98	41,15	41,14	40,82	40,81	40,51	40,50	39,86	39,85	1,33	1,33	1,01
----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------	------	------

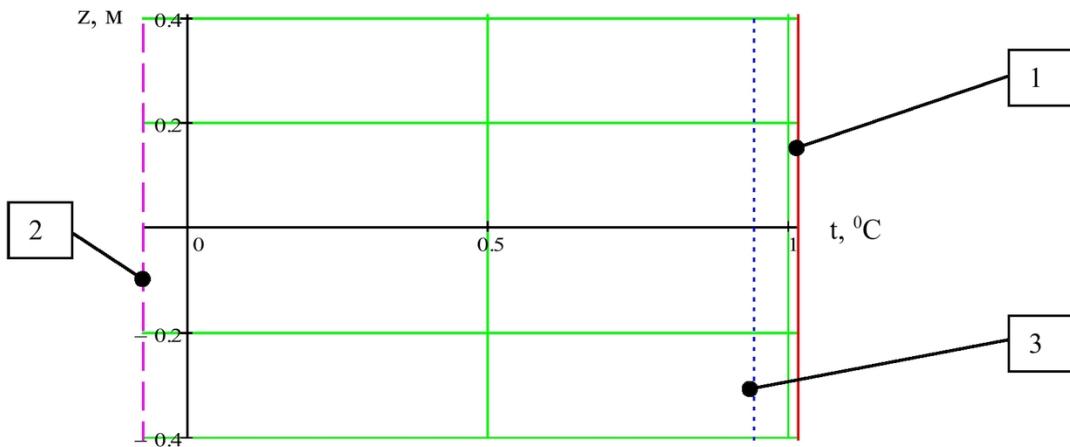


Рис. 2 – График распределения температур при эксплуатации скважины без установки термоэлектрического устройства

$Z$  – длина исследуемого участка;  $t$  – температура: 1 – температура наружной стенки термоизолированного направления; 2 – температура фазового превращения мёрзлого грунта; 3 – текущая температура мёрзлого грунта

- температуру начала замерзания пылевато-глинистых, засоленных и биогенных (заторфованных) грунтов определяют опытным путем [5];
- для предварительных расчетов мерзлых оснований значение допускается принимать по табличному значению СНиП 2.02.04-88 в зависимости от вида грунта и концентрации порового раствора [4];
- температура фазовых превращений от минерализации, глубины залегания поровой воды [3]:

$$t_\phi = -10^{-4} \cdot (l + 38) \cdot K, \quad (2)$$

где  $l$  – глубина рассматриваемого сечения, м;

$K$  – коэффициент, зависящий от литологической принадлежности породы.

В табл. 3 приведены значения поправочного коэффициента  $K$  от литологической принадлежности породы.

Таблица 3 – Значения поправочного коэффициента  $K$  от литологической принадлежности породы [3]

Порода	Таяние	Промерзание
Пески	19,307	37,553
Суглинки	29,765	47,832
Глины	38,925	60,490

Текущую температуру мёрзлой породы приблизительно можно оценить по формуле

$$t_{\text{ср.тек.}} = t_{\text{см.н.}} + t_\phi. \quad (3)$$

На рис.2 представлены графики температур на наружной поверхности термоизолированного направления, фазового превращения и текущая

температура мёрзлого грунта при стационарном процессе.

В расчете температуры на наружной поверхности термоизолированного направления по формуле (1) с допущенными значениями параметров слоев конструкции скважины (табл.2) наблюдается положительная температура, равная  $+1,01$   $^{\circ}\text{C}$ , что может привести к оттаиванию мерзлых пород, образованных из песка, с температурой фазового превращения  $-0,075$   $^{\circ}\text{C}$  (рис. 3). Текущая температура мёрзлого грунта составит  $0,935$   $^{\circ}\text{C}$ . В данном случае необходимо принять технологические меры по уменьшению теплового воздействия скважины на многолетнемерзлую породу.

Для расчета текущей температуры мерзлых пород, в случае установки скважинного термоэлектрического устройства с функцией распределения температуры на наружной поверхности трубы направление, предлагается воспользоваться формулой:

$$t_{\text{ср.тек.}} = t_\phi + t_{\text{см.н.}} + t = t_\phi + t_{\text{см.н.}} - \frac{Q \cdot \delta}{2 \cdot F_M \cdot \lambda} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\delta \cdot \pi \cdot \lambda}} \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot z^2}{4 \cdot \delta \cdot \lambda}} \quad (4)$$

$$t_{\text{ср.тек.}} = -10^{-4} \cdot (l + 38) \cdot K + t_{\text{ж}} - q_{\text{св}} \times \left( \frac{1}{\alpha_{\text{ж}}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) - \quad (5)$$

$$- \frac{Q \cdot \delta}{2 \cdot F_M \cdot \lambda} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\delta \cdot \pi \cdot \lambda}} \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot z^2}{4 \cdot \delta \cdot \lambda}}$$

где  $Q$  – введенное количество теплоты, Вт;  
 $F_m$  – площадь введенного количества теплоты, м<sup>2</sup>;  
 $\rho$  – плотность материала трубы, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала пластины, Вт/(м·°C);  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи пластины и окружающей среды, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  
 $\delta$  – толщина стенки трубы, м;

$t_{окр}$  – температура окружающей среды, °C.

Скважинное термоэлектрическое устройство монтировано на наружной трубе термоизолированного направления, изготовлено в виде кольца длиной 0,05 м и мощностью 50 Вт. Оценим по формуле (5) текущую температуру мёрзлого грунта при установке скважинного термоэлектрического устройства внутри термоизолированного направления (рис. 3).

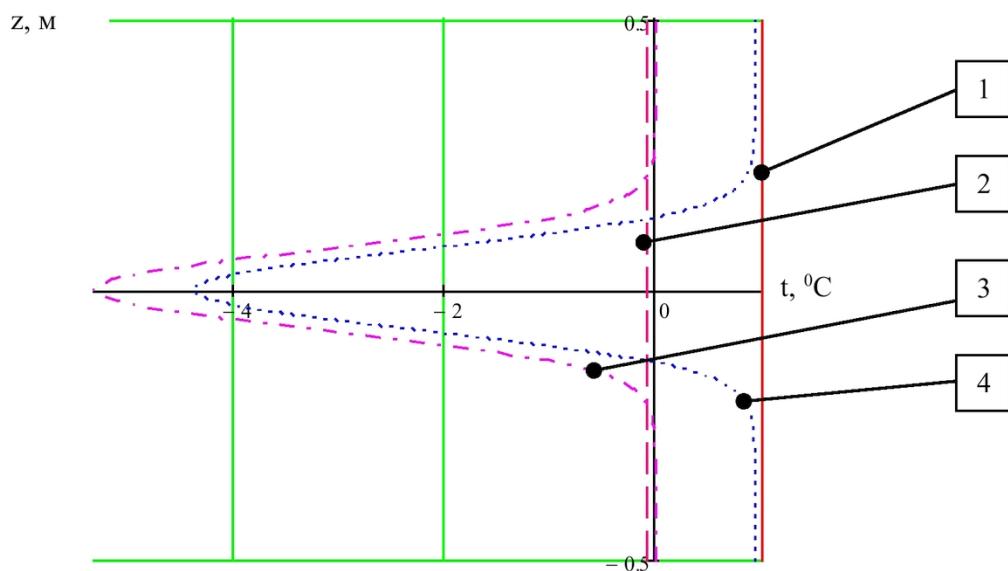


Рис. 3 – График температур при установке скважинного термоэлектрического устройства в скважине из стали с коэффициентом теплопроводности 52 Вт/(м·°C)

$Z$  – длина исследуемого участка;  $t$  – температура: 1 – температура наружной стенки направления; 2 – температура фазового превращения мерзлого грунта; 3 – температура скважинного термоэлектрического устройства; 4 – текущая температура мёрзлого грунта

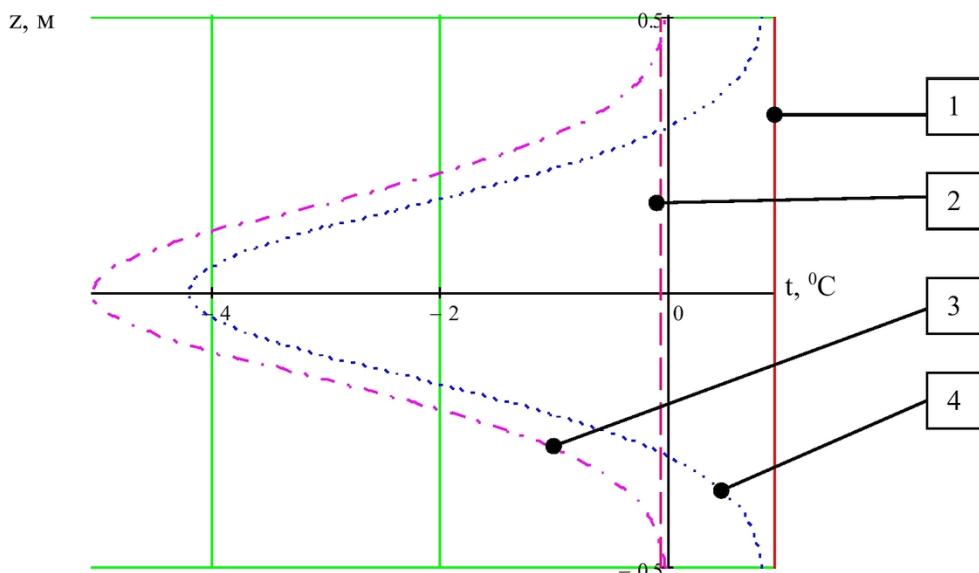


Рис. 4 – График температур при установке скважинного термоэлектрического устройства в скважине из алюминия с коэффициентом теплопроводности 202 Вт/(м·°C)

$z$  – длина исследуемого участка;  $t$  – температура: 1 – температура наружной стенки трубы направление; 2 – температура фазового превращения мерзлого грунта; 3 – температура скважинного термоэлектрического устройства; 4 – текущая температура мёрзлого грунта

Рассмотрим случай, когда наружная поверхность термоизолированного направления изготовлена из алюминия с коэффициентом теплопроводности  $202 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  (рис. 4).

Из сравнения двух графиков (рис. 2 и 3) следует, что при установке скважинного термоэлектрического устройства длиной 0,05 м текущая температура мёрзлого грунта на участке длиной 0,3 м ниже температуры фазового превращения, что говорит о возможности поддержания отрицательной температуры от локального воздействия устройства.

В данном случае график текущей температуры мёрзлого грунта на участке длиной 0,6 м ниже температуры её фазового превращения. Следовательно, для повышения эффективности необходимо

мо наружную поверхность установки скважинного термоэлектрического устройства изготавливать из материала с высокой теплопроводностью.

Из проведенного анализа можем сделать вывод о том, что уравнение (5) позволяет оценить текущую температуру мерзлой породы от конструктивных характеристик скважины, скважинного термоэлектрического устройства и температуры фазового превращения мерзлой породы, построить графики их зависимости.

Выполнено в ходе реализации гранта конкурса «У.М.Н.И.К» по договору № 2308ГУ1/2014 от 19.06.2014 «Разработка устройства для теплоизоляции скважин в районах с многолетнемерзлыми породами»

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулиев, С.М. Температурный режим бурящихся скважин / С.М. Кулиев, Б.И. Есман, Г.Г. Габузов. – М.: Недра, 1968. — 186 с.
2. Исаченко, В.П. Теплопередача: учебное пособие для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – изд. 3-е, перераб. и доп. – М: «Энергия», 1975. – 488 с.
3. Быков, И.Ю. Термозащита конструкций скважин в мерзлых породах: учеб. пособие / И.Ю. Быков, Т.В. Бобылёва. – Ухта: УГТУ, 2007. –131 с.
4. ГОСТ 25100—95 Грунты. Классификация. Дата введ. 01.07.1997 – М.: Минстрой России, 1996. – 23 с.
5. СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – Москва: АПП ЦИТП, 1990. – 59 с.
6. Павлова П.Л., Кондрашов П.М., Зеньков И.В. Результаты исследования изменения температуры устьевой нефтегазовой трубы при использовании термоэлектрического устройства для охлаждения// Вестник ИрГТУ – Иркутск: ИрГТУ – 2016. – №4. – С.46-53

## REFERENCES

1. Kuliev, S.M. Temperaturniyerezhimburyaschihsyaskvazhin/S.M. Kuliev, B.I. Eszman, G.G. Gabuzov. – M.: Nedra, 1968. — 186 p.
2. Isachenko, V.P. Teploperedacha: uchebnoe posobie /V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel – izd. 3-e, pererab. idop. – M: «Energiya», 1975. – 488 p.
3. Byikov, I.Yu. Termozashchitakonstruktisyskvezhinvmerzlyihporodah: ucheb. posobie /I.Yu. Byikov, T.V. BobylYova. – Uhta: UGTU, 2007. –131 p.
4. GOST 25100—95 Gruntyi. Klassifikatsiya. Data vved. 01.07.1997 – M.: Minstroy Rossii, 1996. – 23 p.
5. SNiP 2.02.04-88 Osnovaniya i fundamentyi na vechnomerzlyih gruntah. Moskva: APP TsITP, 1990. – 59 p.
6. Pavlova P.L., Kondrashov P.M., Zenkov I.V. Rezulattyi issledovaniya izmeneniya temperaturyi ustevoy neftegazovoy trubyi pri ispolzovanii termoelektricheskogo ustroystva dlya ohlazhdeniya. Vestnik IrGTU – Irkutsk: IrGTU – 2016. – №4. – Pp.46-53

Поступило в редакцию 19.01.2017

Received 19 January 2017