

УДК [531.8+536.248.1]

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ СКВАЖИННОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ УСЛОВИЙ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

### MATHEMATICAL MODEL OF THE DOWNHOLE THERMOELECTRIC DEVICES FOR PERMAFROST IN THE DEVELOPMENT OF OIL AND GAS FIELDS

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

ассистент, тел.: +7-983-294-48-65, e-mail: praskovya2611@yandex.ru

Pavlova Praskovya L.<sup>1</sup>,

assistant

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

канд.техн. наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: pkondrashov@sfu-kras.ru

Kondrashov Petr M.<sup>1</sup>,

C.Sc. (Engineering), Professor, Head of department,

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

доктор техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: [zenkoviv@mail.ru](mailto:zenkoviv@mail.ru)

Zenkov Igor V.<sup>2</sup>,

Dr.Sc. (Engineering), Associate Professor, 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> Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» ИВТ СО РАН. 660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, 53.

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

**Аннотация.** В данной статье разработана математическая модель распределения теплового потока по стволу скважины от работы скважинного термоэлектрического устройства на основе термоэлектрического эффекта Пельтье, которое позволяет оценить его требуемую холодопроизводительность, температуру на наружной поверхности трубы. Скважинное термоэлектрическое устройство предназначено для уменьшения количества выделяемого теплового потока нефтяной скважиной во время строительства и эксплуатации скважин в Арктических и Северных территориях с многолетнемёрзлыми породами.

**Abstract.** In this article the mathematical model of heat flux distribution along the wellbore from downhole heat device based on the thermoelectric module was developed. which allows us to estimate the required holoprosencephaly, the temperature on the outer surface of the pipe. Downhole thermoelectric-mechanical device is intended to reduce the amount of heat flow in oil wells during the construction and operation of wells in the Arctic and Northern areas with permafrost rocks.

**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

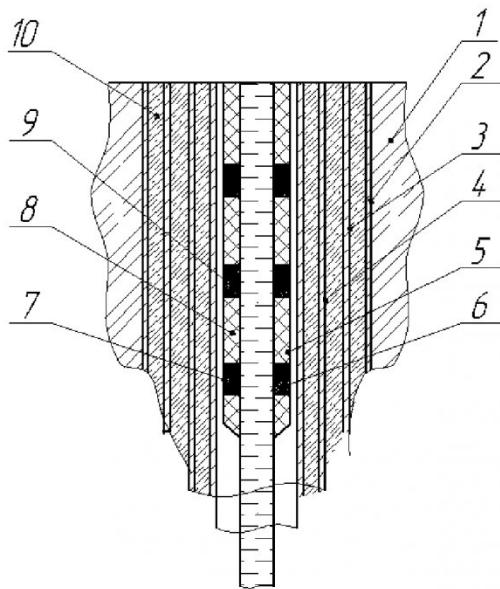
Во время строительства и эксплуатации нефтяных и газовых скважин в зонах распространения мерзлых пород происходит нарушение природного равновесия из-за теплового воздействия добываемого флюида на окружающие горные породы. В результате образуется зона талых пород, которая является фактором проседания, обвалов мерзлых пород, разгерметизации, смятия устьевого оборудования скважины. Поэтому становится важным вопрос и решение проблемы теплового взаимодействия системы скважина – мёрзлый

грунт [12, 13, 14, 15].

В статье предложена схематическая конструкция скважинного термоэлектрического устройства на основе термоэлектрического эффекта Пельтье [1, 2, 3, 4, 5].

Предполагаемая глубина установки данного устройства 20 м от устья скважины, где происходят интенсивные процессы тепломассопереноса между мерзлой породой, скважиной и окружающей поверхностью.

Скважинное термоэлектрическое устройство



*Рис. 1 – Схематическая конструкция скважины с термоэлектрическим устройством: 1 – мёрзлый грунт; 2 – направление; 3 – кондуктор; 4 – промежуточная колонна; 5 -эксплуатационная колонна; 6 – насосно – компрессорная труба; 7 – наружная труба (коужух); 8 – теплоизолирующий материал; 9 – термоэлектрическое устройство*

должно компенсировать потери теплоты флюида за счет разности температур, которые создаются при движении электрического тока по термоэлектрическим модулям [6, 16].

При составлении математической модели работы скважинного термоэлектрического устройства на основе эффекта Пельтье были рассмотрены работы [6, 7, 8, 9, 10, 11].

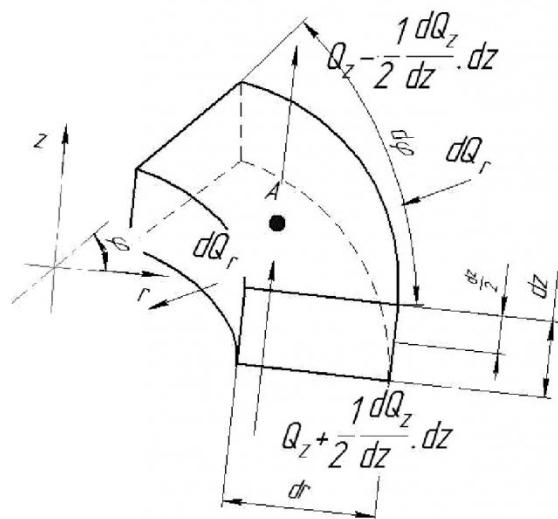


Рис. 3 - Элементарный объемный сегмент со сторонами  $dz$ ,  $dr$  и углом  $d\phi$

В итоге приняты допущения:

- #### **1. Рассмотрен стационарный процесс в системе**

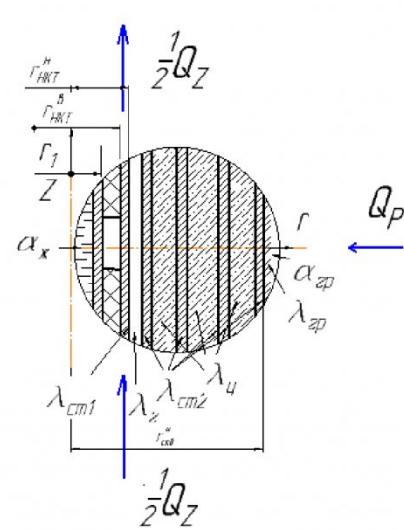


Рис. 2 – Расчетная схема модели работы скважинного термоэлектрического устройства:  $\lambda_{ct1}, \lambda_r, \lambda_{ct2}, \lambda_{\psi}, \lambda_{gr}$  – коэффициенты теплопроводности соответственно насосно-компрессорной трубы, газовой шапки, обсадных труб, цемента и мерзлого грунта;  $\alpha_{gr}, \alpha_{\psi}$  – коэффициенты теплоотдачи мерзлого грунта и флюида;  $r_{HKT}^B, r_{NKT}^B, r_{CKB}^H$  – внутренний и наружный радиусы насосно-компрессорной трубы и радиус скважины (наружный радиус направления) скважина – многоглетнемерзлая порода.

2. Термоэлектрическое устройство принято в виде цилиндрического кольца.

3. Диаметр скважины намного меньше, чем длина скважины.

4. Ось OZ совмещена с осью скважины.

## 5. Рассмотрена холодная сторона скважинного термоэлектрического устройства.

На рис. 1 и 2 показаны схематическая конструкция скважины и расчетная схема работы термоэлектрического устройства.

Для разработки математической модели работы термоэлектрического устройства в скважине выделим элементарный объемный сегмент со сторонами  $dz$ ,  $dr$  и углом  $d\phi$  (рис. 3).

$$dQ_z = Q_z + \frac{1}{2} \cdot \frac{dQ_z}{dz} \cdot dz - Q_z + \frac{1}{2} \cdot \frac{dQ_z}{dz} \cdot dz$$
(1)

$$dQ_z = \frac{dQ_z}{dz} \cdot dz \quad (2)$$

Количество теплоты, выделенное через противоположную грань элементарного объемного сегмента в направлении оси Ог. равно

$$dO_1 \equiv k \cdot (t_1 - t_2) \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot dz \quad (3)$$

Для удобства расчетов примем

$$t_1 - t_2 = \Delta\vartheta \quad (4)$$

где  $k$  - коэффициент теплопередачи рассматриваемой области,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;

$t_1$  - начальная температура, К;

$t_2$  - конечная температура, К.

С другой стороны, какое количество теплоты отдано, то такое количество теплоты приобрела окружающая среда

$$dQ_r = dQ_z \quad (5)$$

Подставим (2) и (3)

$$dQ_z = k \cdot \Delta\vartheta \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot dz \quad (6)$$

Интегрируем

$$\int dQ_z = \int k \cdot \Delta\vartheta \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot dz \quad (7)$$

$$Q_z = k \cdot \Delta\vartheta \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot z + C_1 \quad (8)$$

Из граничных условий определяем  $C_1$ .

В сечении, где находится термоэлектрический модуль, при  $z = 0,5 \cdot L$ ,

где  $L$  – размер термоэлектрического модуля, м; тепловой поток равен холодопроизводительности модуля  $Q_z = -Q_P$

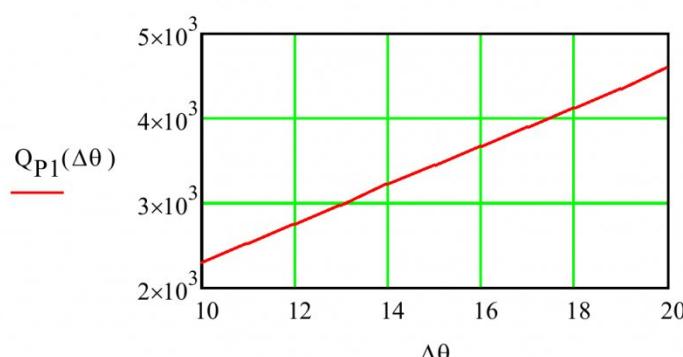


Рис. 4 – График зависимости холодопроизводительности скважинного термоэлектрического устройства по длине ствола НКТ от поддерживаемого перепада температуры  $\Delta\vartheta$  на ее наружной поверхности при коэффициенте теплопередачи равный  $580 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

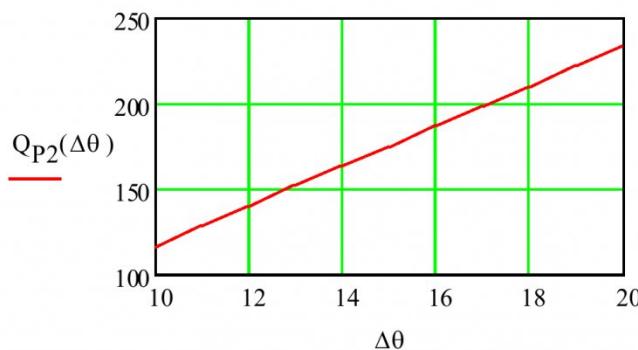


Рис. 5 – График зависимости холодопроизводительности скважинного термоэлектрического устройства по длине ствола НКТ от поддерживаемого перепада  $\Delta\vartheta$  температуры на ее наружной поверхности при коэффициенте теплопередачи равный  $2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  с теплоизоляционным материалом

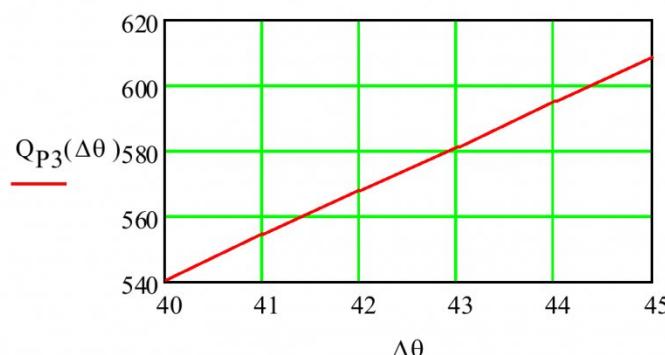


Рис. 6 – График зависимости холодопроизводительности скважинного термоэлектрического устройства по длине ствола трубы направление от поддерживаемого перепада  $\Delta\vartheta$  температуры на наружной поверхности при коэффициенте теплопередачи равный  $2,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Тогда

$$C_1 = -k \cdot \Delta \vartheta \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot L - 0,5 \cdot Q_p \quad (9)$$

Подставляем в (8)  $C_1$

$$Q_z = k \cdot \Delta \vartheta \cdot \pi \cdot 2r z - k \cdot \Delta \vartheta \cdot \pi \cdot 2r \cdot L - 0,5 Q_p \quad (10)$$

По уравнению (10) можно вычислить распределение теплового потока от термоэлектрического устройства по стволу скважины.

Первая часть уравнения (10) характеризует тепловой поток, выделяемый нефтяной скважиной, а вторая – необходимую мощность термоэлектрического устройства для поддержания заданной температуры на её наружной поверхности. Из уравнения следует, что с помощью скважинного термоэлектрического устройства определенной мощности или холодопроизводительности, можно понизить количество теплового потока, исходящее от нефтяной скважины, либо оценить необходимую мощность термоэлектрического скважинного устройства для поддержания заданного перепада температуры на поверхности трубы. В последнем случае уравнение (10) примет вид:

$$Q_p = \frac{Q_z}{0,5} = \frac{k \cdot \Delta \vartheta \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot z + k \cdot \Delta \vartheta \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot L}{0,5} \quad (11)$$

Основным параметром, характеризующим интенсивность теплового потока, исходящий от скважины, является коэффициент теплопередачи  $k$ , зависящий от внешнего диаметра скважины  $d_1$ , диаметров слоев конструкции скважины  $d_i$  (насосно-компрессорной трубы, цементного кольца, обсадной колонны), коэффициента теплопроводности используемых материалов  $\lambda_i$  и коэффициента теплоотдачи многолетнемёрзлой породы  $\alpha_0$ :

$$k = \left( \frac{1}{\alpha_0 \cdot d_1} + \sum \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right)^{-1} \quad (12)$$

Для примера рассмотрим нефтяную скважину с температурой добываемого флюида  $40^{\circ}\text{C}$ , диаметрами направления  $0,820$  м, кондуктора  $0,520$  м, промежуточной колонны  $0,224$  м, эксплуатационной колонны  $0,114$  м, насосно-компрессорной трубы  $0,060$  м, рассматриваемая длина ствола скважины  $1$  м.

Скважинное термоэлектрическое устройство изготовлено в виде кольца длиной  $0,05$  м, с внутренним диаметром  $0,06$  м и наружным  $0,065$  м. По формуле (12) при установке скважинного термоэлектрического устройства на насосно-компрессорной трубе коэффициент теплопередачи равен  $580 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а на трубе направление  $-2,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Оценим по формуле (11) необходимую холодопроизводительность скважинного термоэлектрического устройства от поддерживаемого пере-

пада температуры  $\Delta \vartheta$  на наружной поверхности насосно-компрессорной трубы, либо трубы направление.

На рисунке 4 показан график зависимости холодопроизводительности скважинного термоэлектрического устройства по длине ствола НКТ от поддерживаемого перепада температуры на её наружной поверхности. Заданная температура на наружной поверхности НКТ, уменьшит количество теплового потока, выделяемое нефтяной скважиной, и тем самым способствует сохранению устойчивости скважины.

Из графика следует, что требуемая холодопроизводительность уменьшается с уменьшением необходимого перепада температуры  $\Delta \vartheta$ . Существенно понизить требуемую холодопроизводительность можно уменьшив коэффициент теплопередачи насосно-компрессорной трубы до  $2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  за счет применения тонкого слоя теплоизоляционного материала с коэффициентом теплопроводности  $0,035 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot {^{\circ}\text{C}})$  и толщиной  $0,002$  м (рис.5).

Из сравнения двух графиков (рис. 4; рис. 5) следует, что применение на насосно-компрессорной трубе теплоизоляционного материала почти в 20 раз уменьшает требуемую холодопроизводительность скважинного термоэлектрического устройства.

Рассмотрим случай, когда устройство устанавливается на трубе направление. В данном случае необходимо поддерживать отрицательную температуру на наружной поверхности трубы направление для поддержания отрицательной температуры многолетнемёрзлой породы.

Из графика (рис. 6) видно, что с уменьшением температуры на поверхности трубы направление увеличивается требуемая холодопроизводительность скважинного термоэлектрического устройства, максимальное значение холодопроизводительности достигает  $610$  Вт, минимальное  $540$  Вт.

Из проведенного анализа можем сделать вывод о том, что уравнение (10) позволяет оценить требуемую холодопроизводительность скважинного термоэлектрического устройства, температуру на наружной поверхности трубы, построить графики их зависимости.

### Заключение

Разработка месторождений в Арктических и Северных территориях в мировой нефтяной промышленности требует совершенствования оборудования для поддержания отрицательных температур в многолетнемерзлых породах при строительстве и эксплуатации нефтяных и газовых скважин. Поэтому совершенствование оборудования является актуальной задачей.

В данной статье предложена схематическая конструкция скважинного термоэлектрического устройства на основе термоэлектрического эффекта Пельтье, которое можно установить на насосно-

компрессорную трубу или трубу направление для уменьшения количества выделяемого теплового потока скважиной для обеспечения ее устойчивости в многолетнемерзлой породе. В итоге разработана математическая модель распределения теплового потока от термоэлектрического устройства по стволу скважины. С помощью данного уравнения можно оценить ее требуемую холодопроизводительность, температуру на наружной поверхности трубы, построить графики их зависимости. В дальнейшем необходимо провести экспериментальные исследования для определения оптимальных характеристик и оценки эффективности применения термоэлектрических устройств.

Следует отметить, что конструкция термозащитного оборудования, которая могла бы приме-

няться непосредственно внутри самой скважины для уменьшения интенсивности теплового потока, недостаточно освещена или не существуют. Поэтому весьма перспективным является разработка данного скважинного термоэлектрического устройства для регулирования и поддержания в определенных пределах температуры на поверхности труб во время строительства и эксплуатации скважин для сохранения устойчивости многолетнемерзлой породы

*Выполнено в ходе реализации грантаконкурса «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. Быков И.Ю. Т.В. Бобылёва Термозащита конструкций скважин в мерзлых породах: учеб. пособие. Ухта: УГТУ, 2007. 131 с.: ил.
2. Павлова П.Л., Колосов М.В., Кондрашов П.М., Зеньков И.В. Разработка опытного образца устройства для термостабилизации мерзлой породы // Научно-технический журнал «Нефтегазовое дело» - Уфа: УГНТУ – 2014 г. №6 679-697 с.
3. Павлова П.Л., Зеньков И.В. Анализ термозащитного оборудования для строительства и эксплуатации скважин в районах с многолетнемерзлыми породами // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей- Новокузнецк, 2015, С. 84-87
4. Павлова П.Л., Кондрашов П.М. Термокейс активного типа для строительства и эксплуатации скважин в районах с мерзлыми породами // Сборник тезисов 69-й международной молодежной конференции "Нефть и газ-2015" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина
5. Пат. №2500880 Российская Федерация, МПК E21B36/00. Устройство для теплоизоляции скважины в многолетнемерзлых породах / Колосов В.В., Бирих Р.А., Павлова П.Л., Лунев А.С.: заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2012125732; заявл. 19.06.12; опубл. 10.12.13. 5 с.
6. Иоффе А.И., Стильбанс Л.С., Иорданишвили Е.К., Ставицкая Т.С. Термоэлектрическое охлаждение. М., АН СССР, 1956 г. 113 с.: ил.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учеб. пособие для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1975 г. 488 с.: ил.
8. Кондрашов П.М., Легаев П.В., Зеньков И.В. Математическая модель движения поршня гидродинамического скважинного генератора // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 11. С. 45-49
9. Кондрашов П.М., Легаев П.В., Махно Д.Е., Черныш В.Ф. Зеньков И.В. Разработка конструкции лабораторной установки и результаты моделирования работы гидродинамического скважинного генератора // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 12. С. 47-52
10. Зеньков И.В., Легаев П.В. Научное обоснование оптимальных параметров гидродинамических скважинных генераторов пружинно-клапанного типа // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13, № 1.
11. Шухов В.Г. Гидротехника. Избранные труды, М., Наука, 1981. 221 с.
12. Kenneth M. Hinkel, Frederick E. Nelson, Walter Parker Climate Change, Permafrost, and Impacts on Civil Infrastructure In: U.S. Arctic Research Commission. Permafrost Task Force Report, December 2003
13. Vrielink H., BP; J.S. Bradford, Chevron; L. Basarab, Tesco Corp; C.C. Ubaru, Hughes Christensen Casting-while-drilling successfully applied in Canadian Arctic permafrost environment In: Drilling contractor, May/June 2008 <http://www.drillingcontractor.org/casing-while-drilling-successfully-applied-in-canadian-arctic-permafrost-environment-1624>
14. Andrey, B, Gurban, V, Stanislav, K, Alexey, C ,Vadim, M Drilling with casing system continues successful drilling of permafrost sections in arctic circle of Western Siberia (Russian Federation) In: Society of Petroleum Engineers - Arctic Technology Conference 2014, pp. 591-594
15. Van Lopik, J.H., Hartog, N., Zaadnoordijk, W.J., Cirkel, D.G., Raoof, A. Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings In: Water Resources ,2015, pp. 32-45
16. Luciana W. da Silva, Massoud Kaviany Micro thermoelectric cooler: interfacial effects on thermal and electrical transport In: The international journal of heat and mass transfer

## REFERENCES

1. Bykov I.Ju. T.V. Bobyljova Termozashhita konstrukcij skvazhin v merzlyh porodah: ucheb. posobie. Uhta: UGTU, 2007. 131 s.: il.
2. Pavlova P.L., Kolosov M.V., Kondrashov P.M., Zen'kov I.V. Razrabotka opytnogo obrazca ustroystva dlja termostabilizacii merzloj porody // Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Neftegazovoe delo» - Ufa: UGNTU – 2014 g. №6 679-697 s.
3. Pavlova P.L., Zen'kov I.V. Analiz termozashhitnogo oborudovaniya dlja stroitel'stva i jekspluatacii skvazhin v rajonah s mnogoletnemерzlymi porodami // Naukoemkie tehnologii razrabotki i ispol'zovanija mineral'nyh resursov: sb. nauch. statej- Novokuzneck, 2015, S. 84-87
4. Pavlova P.L., Kondrashov P.M. Termokejs aktivnogo tipa dlja stroitel'stva i jekspluatacii skvazhin v rajonah s merzlymi porodami // Sbornik tezisov 69-j mezhdunarodnoj molodezhnoj konferencii "Neft' i gaz-2015" RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina
5. Pat. №2500880 Rossijskaja Federacija, MPK E21B36/00. Ustroystvo dlja teploizoljacii skvazhiny v mnogoletnemерzlyh porolah / Kolosov V.V., Birih R.A., Pavlova P.L., Lunev A.S.: zayavite'l i patentoobladeatel' FGAOU VPO «Sibirskij federal'nyj universitet». – № 2012125732; zayavl. 19.06.12; opubl. 10.12.13. 5 s.
6. Ioffe A.I., Stil'bans L.S., Iordanishvili E.K., Stavickaja T.S. Termojelektricheskoe ohlazhdenie. M., AN SSSR, 1956 g. 113 s.: il.
7. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha: ucheb. posobie dlja vuzov, izd. 3-e, pere-rab. i dop. M., «Jenergija», 1975 g. 488 s.: il.
8. Kondrashov P.M., Legaev P.V., Zen'kov I.V. Matematicheskaja model' dvizhenija porshnya gidrodinamicheskogo skvazhinnogo generatora // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. 2014. № 11. S. 45-49
9. Kondrashov P.M., Legaev P.V., Mahno D.E., Chernysh V.F. Zen'kov I.V. Razrabotka konstrukcii laboratornoj ustanovki i rezul'taty modelirovaniya raboty hidrodinamicheskogo skvazhinnogo generatora // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. 2014. № 12. S. 47-52
10. Zen'kov I.V., Legaev P.V. Nauchnoe obosnovanie optimal'nyh parametrov hidrodinamicheskikh skvazhinnyh generatorov pruzhino-klapannogo tipa // Neftegazovoe delo. 2015. T. 13, № 1.
11. Shuhov V.G. Gidrotehnika. Izbrannye trudy, M., Nauka, 1981. 221 s.
12. Kenneth M. Hinkel, Frederick E. Nelson, Walter Parker Climate Change, Permafrost, and Impacts on Civil Infrastructure In: U.S. Arctic Research Commission. Permafrost Task Force Report, December 2003
13. Vrielink H., BP; J.S. Bradford, Chevron; L. Basarab, Tesco Corp; C.C. Ubaru, Hughes Christensen Casting-while-drilling successfully applied in Canadian Arctic permafrost environment In: Drilling contractor, May/June 2008 <http://www.drillingcontractor.org/casing-while-drilling-successfully-applied-in-canadian-arctic-permafrost-environment-1624>
14. Andrey, B, Gurban, V, Stanislav, K, Alexey, C ,Vadim, M Drilling with casing system continues successful drilling of permafrost sections in arctic circle of Western Siberia (Russian Federation) In: Society of Petroleum Engineers - Arctic Technology Conference 2014, pp. 591-594
15. Van Lopik, J.H., Hartog, N., Zaadnoordijk, W.J., Cirkel, D.G., Raoof, A. Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings In: Water Resources ,2015, pp. 32-45
16. Luciana W. da Silva, Massoud Kaviani Micro thermoelectric cooler: interfacial effectson thermal and electrical transport In: The international journal of heat and mass transfer

Поступило в редакцию 15.04.2016

Received 15 April 2016