

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОРЕОЛА ПРОТАИВАНИЯ ВОКРУГ ТРУБОПРОВОДА, ПРОЛОЖЕННОГО В МЕРЗЛОЙ НАСЫПИ

УДК 622.692.4:
624.139

EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF POSSIBILITY TO CONTROL THAWING HALO AROUND THE PIPELINE LAID IN FROZEN FILL

Шамов С.А., Колоколова Н.А.,
Гаррис Н.А.

ФГБОУ ВПО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

S.A. Shamov, N.A. Kolokolova,
N.A. Garris

FSBEI of HPE Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, the Russian Federation
FSBEI of HPE Bashkir State
University,
Sterlitamak branch,
the Russian Federation

В связи с освоением нефтегазоносных регионов Крайнего Севера, сложенных вечномерзлыми и многолетнемерзлыми грунтами, особенно остро встает вопрос транспортировки углеводородов, как по промысловым, так и по магистральным трубопроводам в этих районах.

Данная статья посвящена экспериментальному обоснованию возможности транспортировки нефти в наземном варианте прокладки трубопровода. В статье описаны опытная установка по изучению теплообмена между наземным трубопроводом, проложенным в мерзлой насыпи, и мерзлым грунтом; а также ход и условия проведения эксперимента. Так как теплофизические свойства грунта «модели» и «натуры» идентичны, то выполняется равенство чисел Лыкова Lu и Ковнера Kv. При соблюдении равенства температурных напоров, идентичности грунтов и одинаковом уровне их влажности – равенство чисел Коссовича Ko и Постнова Pn. Задача моделирования условий теплообмена сводилась к такому подбору параметров установки, чтобы обеспечивалось равенство чисел Фурье Fo и Кирпичева Ki для натуры и модели. Моделировались условия теплообмена магистрального трубопровода, диаметром Dвнеш = 529мм, проложенного в насыпи на многолетнемерзлых грунтах. Результаты эксперимента проанализированы и приведены в графическом виде, построен график зависимостей мощности теплового источника, температуры на поверхности трубы и глубины протаивания от времени. Представлены 6 температурных профилей, показывающих динамику ореолов протаивания при регулируемом теплообмене в течение года. Опытным путем доказана возможность регулирования режима работы трубопровода, проложенного в многолетнемерзлых грунтах.

In connection with development of oil and gas fields in the Extreme North formed by permafrost and multiyear frozen soils particularly pointed is a problem of hydrocarbon transportation both by field and main pipelines in these regions.

This article is devoted to experimental justification of possibility to transport oil in above ground variant of piping. The article describes an experimental facility for studying heat-exchange between above ground pipeline laid in frozen fill and frozen ground, as well as the experimental procedure and conditions.

Since thermophysical properties of the "model" and "nature" grounds are identical, equality of Lykov Lu and Kovner Kv numbers is fulfilled. With temperature difference balanced, identity of the grounds and similarity of their moisture levels - equality of Kossovich Ko and Postnov Pn numbers is fulfilled. Heat-mass-exchange simulation objective was to adjust set-up parameters in such a way as to ensure equality of Fourje Fo and Kirpichev Ki numbers for nature and model. Heat exchange conditions for main pipeline with outside diameter Dout = 529 mm laid in multiyear frozen ground fill were simulated.

Results of the experiment have been analyzed and graphically presented. Heat source capacity, pipe surface temperature and thawing depth vs time dependence diagram has been constructed. Six temperature profiles showing thaw halos with heat ex-change being controlled during one year is presented. Experience has justified the possibility of controlling operating conditions of the pipeline laid in multiyear frozen grounds.

Ключевые слова: мерзлые грунты, наземные трубопроводы, насыпь, тепловое взаимодействие; экспериментальная установка по изучению регулируемого теплообмена, ореол протаивания.

Key words: frozen grounds, ground pipelines, fill, thermal interface, experimental facility for studying controlled heat exchange, thawing halo.

В связи с освоением нефтегазоносных регионов Крайнего Севера, сложенных вечномерзлыми и многолетнемерзлыми грунтами, особенно остро встает вопрос транспортировки углеводородов, как по промысловым, так и по магистральным трубопроводам в этих районах.

Мерзлота по своей природе не является статичным основанием [1]. Сезонные температурные колебания на поверхности Земли, строительство

трубопроводов, транспортировка углеводородов трубопроводным транспортом самым непосредственным образом сказываются на динамике изменения мерзлотного слоя.

В процессе строительства и эксплуатации трубопроводных систем происходит вживание их техногенных элементов в естественную природную среду: происходит нарушение естественного теплового равновесия, вследствие чего происходит протаивание (промерзание) подстилающих грунтов [2, 3].

В случае подземной прокладки велика вероятность всплытия (при положительной плавучести), либо оседания трубопровода, что может привести к аварии трубопровода, сопровождающейся большими потерями транспортируемых продуктов.

При надземной прокладке (на сваях) трубопровод подвержен колебаниям от ветровой нагрузки,

перемещениям от температурных перепадов, выпучиванию как обычных бурозабивных, так и термосвай, что приводит к потере устойчивости трубопровода, и т. д.

Поэтому, учитывая требования надежности и экологической безопасности системы, можно выделить две взаимосвязанные проблемы, требующие скорейшего решения:

- уменьшения теплового воздействия на подстилающие вечномерзлые грунты;
- выбора способа прокладки трубопроводов в районах вечномерзлых грунтов.

Надземный и подземный способы прокладки [4] лишь отчасти решают проблему сбережения природных ресурсов крайне чувствительных к нарушению экологического равновесия районов многолетнемерзлых грунтов. Поэтому, учитывая принцип минимизации техногенного воздействия, необходимо решить задачу возможности транспорта нефти по трубопроводу в варианте наземной прокладки в насыпи. Такой вариант является перспективным, но недостаточно изученным.

Задача ограничения ореола протаивания вокруг трубопровода довольно сложна и, поставив целью получение «точного» решения, мы непременно зашли бы в тупик по ряду причин:

- грунт в зоне теплового влияния в процессе промерзания-протаивания явно неоднородный и неизотропный [3, 5];
- изменение теплофизических характеристик грунта в колебательном процессе, сопровождающемся фазовыми переходами грунтовой воды из мерзлого состояния в талое и обратно, аналитически не поддается описанию;
- невозможность учета и прогнозирования с достаточной степенью точности нестабильности грунтовых условий [5, 6, 7], климатических факторов [8];
- вероятность появления бугров пучения вдоль трассы трубопровода и т.д.

Поэтому любое аналитическое решение в данной ситуации следует считать приближенным. С целью оценки возможности наземной прокладки трубопровода в насыпи и определения ее основных параметров был поставлен опыт по регулированию теплообмена трубопровода в мерзлом грунте [6].

Для создания адекватной физической модели необходимо обеспечить условия теплообмена вечномерзлого грунта с участком нефтепровода, уложенного в насыпи. Согласно теории подобия, при равенстве чисел подобия, характеризующих процесс теплообмена, и соблюдении геометрического подобия, процессы теплообмена можно считать подобными. Поскольку теплофизические свойства грунта «модели» и «натуры» идентичны, то выполняется равенство чисел Лыкова Lu и Ковнера Kv . При соблюдении равенства температурных напоров,

идентичности грунтов и одинаковом уровне их влажности – равенство чисел Коссовича Ko и Постнова Pn . Задача моделирования условий теплообмена сводится к такому подбору параметров установки, чтобы обеспечивалось равенство чисел Фурье $F_o = at/R_{тр}^2$ и Кирпичева Ki для натуры и модели [9, 10, 11].

Эксперимент проводился в лаборатории на кафедре «Гидравлика и гидромашин» Уфимского государственного нефтяного технического университета (ГОУ ВПО УГНТУ).

Целями эксперимента были:

- определить возможность ограничения ореола протаивания вокруг наземного трубопровода (рисунок 1);
- исследовать динамику ореолов протаивания при регулируемом теплообмене во времени.

Моделировались условия теплообмена магистрального трубопровода, диаметром $D_{внеш} = 529$ мм, проложенного в насыпи на многолетнемерзлых грунтах. Модельный трубопровод представляет собой участок трубы, проложенный на поверхности песка в насыпи. В качестве трубы установлен двухконцевой трубчатый электронагреватель ТЭН-70А13/1,3J220Ф1 [14], с диаметром оболочки $D_{н} = 13$ мм, с помощью которого регулируется тепловой поток в соответствии с заранее высчитанным расчетным режимом.

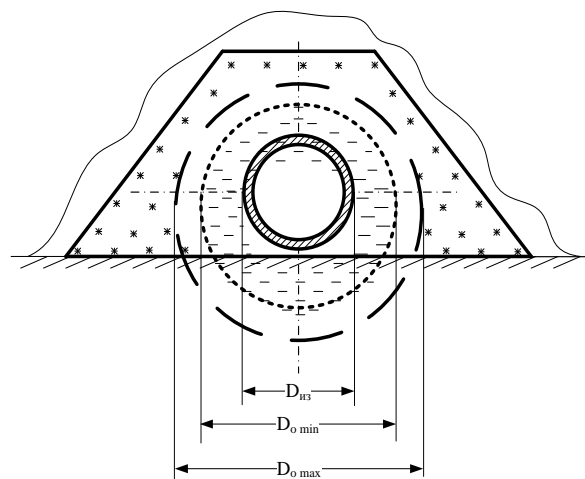


Рисунок 1. Изменение ореола протаивания

Схема опытной установки [12, 13] изображена для изучения процесса теплообмена между наземным трубопроводом, проложенным в насыпи, и мерзлым грунтом на рисунке 2.

Жестяной короб, размером 40×72 см и высотой 40 см, заполнен специально подготовленным, заранее просеянным, влажным песком, который и моделировал мерзлый песчаный грунт севера Тюменской области. Песок загружался на высоту 20 см от дна короба до уровня нижней образующей модельного трубопровода. Размеры насыпи определялись исходя

из геометрического подобия между «натурой» и «моделью».

Перед началом эксперимента, для воссоздания и поддержания свойств мерзлого грунта и окружающего воздуха, короб был помещен в морозильную камеру, где он в течение 3-х дней находился при постоянной минусовой температуре, пока температура песка не стала постоянной по всему объему (показания установленных ниже трубки ХК – термопар должны отличаться не более, чем на 0,01 мВ) [12, 13].

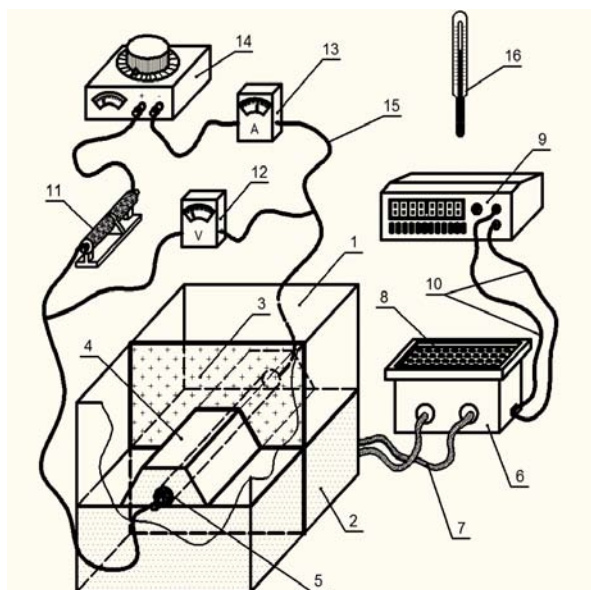


Рисунок 2. Экспериментальная установка

1 – жестяной короб холодильной камеры; 2 – грунт; 3 – сетка термопар, выполненная на каркасе из оргстекла; 4 – насыпь; 5 – ТЭН; 6 – панель; 7 – связка термопар; 8 – переключатель; 9 – милливольтметр; 10 – компенсационные провода; 11 – реостат; 12 – вольтметр; 13 – амперметр; 14 – блок питания; 15 – соединительные провода; 16 – термометр

Для моделирования перекачки продукта с положительным значением температуры на ТЭН подается напряжение порядка 10...20В, в зависимости от режима. Вокруг него образуется ореол протаивания [12]. В натуральных условиях размеры талой зоны зависят не только от геометрических размеров насыпи и положения трубы в ней, но и определяются величиной теплового потока от трубы в грунт $q_{мп}$, теплом трения и параметрами теплообмена. При проведении опыта в лабораторных условиях тепловой поток регулировался и поддерживался на расчетном уровне путем изменения силы тока и напряжения, подаваемого на ТЭН. В процессе опыта не допускались отклонения температуры воздуха t_v более, чем на 0,5 °С от первоначальных значений с тем, чтобы условия теплообмена на границе грунт-воздух и боковых поверхностях оставались неизменными на протяжении всего эксперимента [9].

В замерном сечении на каркасе из оргстекла установлены датчики для замера температурного поля – термопары [15], которые подсоединены к

панели ПДП-ТП-36, позволяющей подключить одновременно до 36 термопар для удобства и быстрого снятия показаний с них (рисунок 3). Панель в свою очередь подключена к милливольтметру, который на цифровом табло выдает значение ЭДС каждой термопары, уложенной в грунт; показания записываются в таблицу и переводятся в градусы Цельсия по градуировочной таблице «перевода милливольт в градусы» [16] с учетом температуры окружающего воздуха вокруг холодного спая. Для измерения температуры наружной стенки ТЭНа были зачеканены термопары в 3-х точках: на верхней образующей, нижней образующей и на боковой образующей трубопровода.

В эксперименте использовались термопары L-типа хромель – капель (ТХК). Их выбор обусловлен подходящим температурным диапазоном и точными показаниями термо ЭДС при температурах на горячем спае, близких к нулю по Цельсию.

В реальных условиях температура грунта изменяется с изменением времени года [1, 4]. Так как возможности установки не позволяют осуществлять изменение температуры воздуха над поверхностью грунта t_v , а следовательно и естественных температур грунта t_e и насыпи (среды) t_{cp} соответственно годичному периоду колебания этих температур в натуре, то эксперимент проводился при $t_v = const$ и $t_e = const$, поэтому изменялся тепловой поток. Уменьшение или увеличение его производилось в зависимости от того, какой период года моделировался в ходе опыта. На основании подобия [11], из равенства чисел Фурье, для годового периода эксплуатации нефтепровода диаметром $D_{внеш} = 529$ мм получаем для модели:

$$\tau' = \tau \cdot \frac{R_{TP}'^2}{R_{TP}^2} = 365 \cdot 24 \cdot \frac{0,013^2}{0,529^2} = 5,27 \text{ ч.}$$

Так, годовой период на установке «проходит» за 5 ч 16 мин.

По ходу эксперимента замерялись следующие параметры:

Показания термопар снимались милливольтметром класса 0,001. Переключение термопар осуществлялось через панель ПДП-ТП-36.

Температуры воздуха вокруг холодного спая, на поверхности грунта, а также самой насыпи на уровне трубопровода, измерялись ртутными термометрами с ценой деления 0,1 °С.

Напряжение и сила тока, подаваемые на ТЭН, измеряются вольтметром (класс точности 1) и амперметром (класс точности 1).

Результаты опытов оформлялись графически. При построении температурных полей выполнялась двойная интерполяция: во времени и графическая. Размеры ореолов протаивания устанавливались по

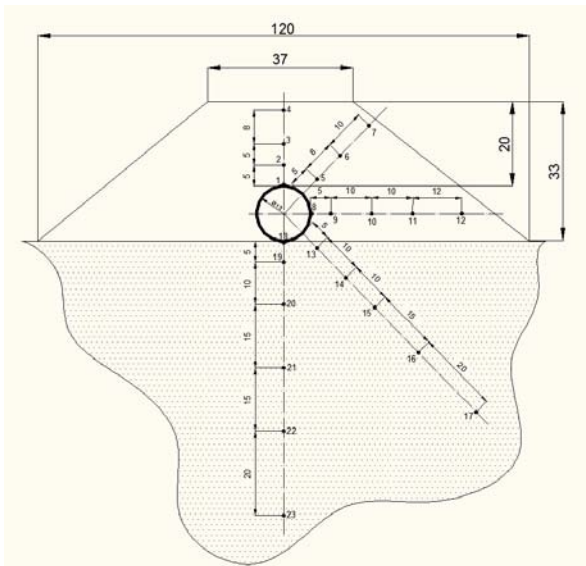


Рисунок 3. Схема расстановки термопар на каркасе из оргстекла

нулевым изотермам. Значение радиуса протаивания R_0 усреднялось по 5-ти направлениям: вверх, вниз, по горизонтали и под углом 45 градусов к оси трубы вверх и вниз. Основные параметры одного из опытов, характеризующие теплообмен, представлены на рисунке 4 в виде графических зависимостей мощности теплового источника q , температуры на поверхности трубы t_s и глубины протаивания R_0 от времени.

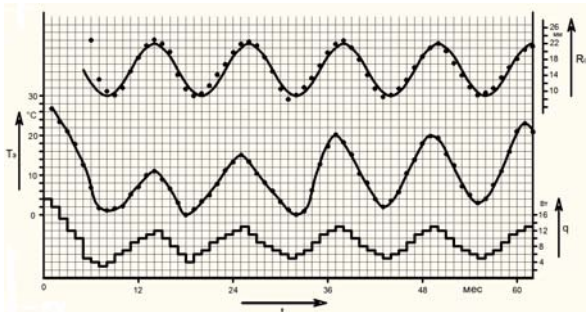


Рисунок 4. График зависимостей мощности теплового источника q , температуры на поверхности трубы t_s и глубины протаивания R_0 от времени t

Из графиков видно, что температурное поле вокруг трубопровода в насыпи перестраивается на режим, диктуемый управляющими факторами. Происходит саморегуляция, позволяющая неравновесным процессам протекать от одного стационарного состояния к другому. Это типичный квазистационарный режим, аналогичный тем, что встречаются в природе. Опыт наглядно подтверждает справедливость применения метода смены стационарных состояний для подобных процессов.

В процессе опыта, проведенного в соответствии с расчетным режимом, ореолы протаивания практически не выходили за допустимые пределы.

Длительность данного опыта, состоящего из 5-ти циклов, соответствующих 5-ти годам эксплуатации нефтепровода в натуре, достаточна для того, чтобы утверждать, что подобное регулирование осуществимо.

Таким образом, согласно проведенным исследованиям прогрессирующего протаивания мерзлого грунта под трубопроводом можно избежать.

Особый интерес представляют форма и положение нулевой изотермы, которая разделяет талую и мерзлую зоны грунта вокруг трубопровода. Всего было построено 12 температурных полей на 3-й цикл от начала эксперимента, по числу месяцев в году.

На рисунке 5 представлены 6 температурных полей, показывающих динамику ореолов протаивания при регулируемом теплообмене. Как видно из рисунка, под трубопроводом форма талой зоны близка к полуокружности. В насыпи же нулевая изотерма проходит где-то на границе грунта и воздуха. При уменьшении теплового потока, идущего от трубы, нулевые изотермы оказываются замкнутыми. Конфигурация их приближается к окружностям. Радиусы протаивания, отмеренные вниз от оси трубопровода, в горизонтальном направлении и вверх неодинаковы. Вниз от трубы уходит меньше тепла, нежели вверх.

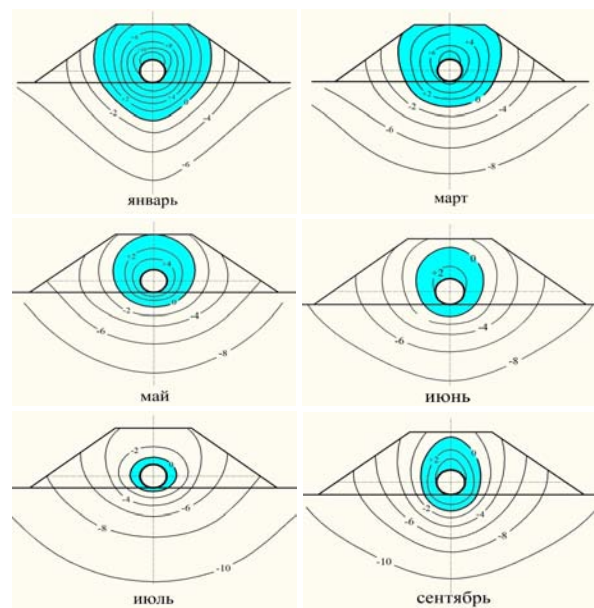


Рисунок 5. Динамика ореолов протаивания при регулируемом теплообмене на 3-й цикл от начала эксперимента

Выводы

Как видно из опыта, регулирование режима работы трубопровода, проложенного в многолетнемерзлых грунтах, вполне возможно и осуществимо при соблюдении соответствующего регламента эксплуатации нефтепровода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ
ИСТОЧНИКОВ

1. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 450 с.
2. Павлов А.В. Техногенные ландшафты севера и их рекультивация. Новосибирск: Наука, 1979. 159 с.
3. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 284 с.
4. Кривошеин Б.Л., Агапкин В.М., Двойрис Л.Д. Способы прокладки и эксплуатации трубопроводов в условиях вечной мерзлоты// Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов: обзор.информ ВНИИОЭНГ. М.,1975. 111с.
5. Савельев А.Б. Физика, химия и строение природных льдов и мерзлых горных пород. М.: Недра, 1971. 256с.
6. Гречишев Э.Д., Ершов С.Е. Новые методы исследования состава, строения и свойств мерзлых грунтов. М.: Недра, 1983. 140 с.
7. Фельдман Г.М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988. 258 с.
8. Ершов Э.Д. Физико-химия и механика мерзлых пород. М.: изд-тво Моск. ун-та, 1986. 335 с.
9. Ершов Э.Д. Лабораторные методы исследования мерзлых пород. М.: изд-во Моск. ун-та, 1985. 352 с.
10. Лыков А.В. Тепломассобмен (справочник). М.: Энергия, 1978. 480 с.
11. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука, 1982. 281 с.
12. Новоселов В.В. Тугунов П.И., Забазнов А.И. Теплообмен подземного трубопровода с внешней средой в сложных гидрологических условиях. М.: ВНИИЭгазпром, 1992. 148 с.
13. Новоселов В.В. Глазырина В.М., Гимранов Г.А. Экспериментальное сравнение процессов внешнего теплообмена трубопроводов, проложенных в водонасыщенном грунте и в непроточной воде //Транспорт и хранение нефти: экспресс-информ. НИИОЭНГ, 1988. С.10-13.

14. ГОСТ 13268-88. Электронагреватели трубчатые. М.: изд-во стандартов, 2001. 41 с.

15. ГОСТ Р 8.585-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термомпары. Номинальные статические характеристики преобразования. М.: изд-во стандартов, 2001. 27 с.

REFERENCES

1. Cytovich N.A. Mehanika merzlykh gruntov. M.: Vysshaya shkola, 1973. 450 s. [in russian].
2. Pavlov A.V. Tehnogennyye landshafty severa i ih rekul'tivaciya. Novosibirsk: Nauka, 1979. 159 s. [in russian].
3. Pavlov A.V. Teplofizika landshaftov. Novosibirsk: Nauka, 1979. 284 s. [in russian].
4. Krivoshein B.L., Agapkin V.M., Dvoiris L.D. Sposoby prokladki i ekspluatatsii truboprovodov v usloviyah vechnoi merzloty// Transport i hranenie nefiti i nefteproduktov: obzor.inform VNIIOENG. M.,1975. 111s. [in russian].
5. Savel'ev A.B. Fizika, himiya i stroenie prirodnykh l'dov i merzlykh gornyh porod. M.: Nedra, 1971. 256s. [in russian].
6. Grechishev E.D., Ershov S.E. Novyye metody issledovaniya sostava, stroeniya i svoystv merzlykh gruntov. M.: Nedra, 1983. 140 s. [in russian].
7. Fel'dman G.M. Peredvizhenie vlagi v talyh i promerzayushih gruntah. Novosibirsk: Nauka, 1988. 258 s. [in russian].
8. Ershov E.D. Fiziko-himiya i mehanika merzlykh porod. M.: izd-tvo Mosk. un-ta, 1986. 335 s. [in russian].
9. Ershov E.D. Laboratornyye metody issledovaniya merzlykh porod. M.: izd-vo Mosk. un-ta, 1985. 352 s. [in russian].
10. Lykov A.V. Teplomassobmen (spravochnik). M.: Energiya, 1978. 480 s. [in russian].
11. Kutateladze S.S. Analiz podobiya v teplofizike. Novosibirsk: Nauka, 1982. 281 s. [in russian].

12. Novoselov V.V. Tugunov P.I., Zabaznov A.I. Teploobmen podzemnogo truboprovoda s vneshnei sredoi v slozhnykh gidrologicheskikh usloviyah. M.: VNIIEgazprom, 1992. 148 s. [in russian].

13. Novoselov V.V. Glazyrina V.M., Gimranov G.A. Eksperimental'noe sravnienie processov vneshnego teploobmena truboprovodov, prolozhennykh v vodonasyshennom grunte i v neprotochnoi vode //Transport i hranenie nefiti: ekspresinform. NIIOENG, 1988. S.10-13. [in russian].

14. GOST 13268-88. Elektronagrevateli trubchatye. M.: izd-vo standartov, 2001. 41 s. [in russian].
15. GOST R 8.585-2001. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Termopary. Nominal'nye staticheskie harakteristiki preobrazovaniya. M.: izd-vo standartov, 2001. 27 s. [in russian].

Шамов С.А., аспирант кафедры «Гидравлика и гидромашин», ФГБОУ ВПО УГ-НТУ, г. Уфа, Российская Федерация
S.A. Shamov, Post-graduate student of the Chair «Hydraulics and Hydraulic Machines», FSBEI of HPE Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, the Russian Federation

Колоколова Н.А., старший преподаватель кафедры Гидравлика и гидро-машины, ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация
N.A. Kolokolova, Senior Teacher of the Chair «Hydraulics and Hydraulic Machines», FSBEI of HPE Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, the Russian Federation

Гаррис Н.А., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидравлика и гидромашин», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация
N.A. Garris, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair «Hydraulics and Hydraulic Machines», FSBEI of HPE Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, the Russian Federation

e-mail nina_garris@mail.ru