

УДК 622.253.35

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕПЛОТДАЧИ МЕЖДУ ХЛАДОНОСИТЕЛЕМ В ЗАМОРАЖИВАЮЩЕЙ КОЛОНКЕ И ОКРУЖАЮЩИМИ ПОРОДАМИ

Семина Михаил Александрович¹,
seminma@inbox.ru

Головатый Иван Иванович²,
belaruskali.office@kali.by

Бородавкин Дмитрий Алексеевич¹,
borodavkin.dmitriy@gmail.com

¹ Горный институт УрО РАН,
Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а.

² ОАО «Беларуськалий»,
Республика Беларусь, 223710, г. Солигорск, ул. Коржа, 5.

Актуальность исследования обусловлена высокой востребованностью способа искусственного замораживания горных пород при проходке вертикальных шахтных стволов. Анализ методов расчета теплоотдачи от породного массива к рассолу в замораживающих колонках позволит определить пути дальнейшего совершенствования методик расчета теплоотдачи. Результаты исследований окажутся полезны при проектировании ледопородных ограждений шахтных стволов.

Цель: выполнить анализ существующих методов расчета теплоотдачи между хладоносителем в замораживающей колонке и окружающими породами, определить основные пути дальнейшего совершенствования методов расчета теплоотдачи в условиях коаксиальных замораживающих колонок.

Объекты: система «рассол – замораживающая колонка – замораживаемый породный массив».

Методы: сравнительный анализ существующих методов расчета теплоотдачи, численное моделирование в программном комплексе Ansys Fluent.

Результаты. Проведен сравнительный анализ существующих подходов и методов расчета коэффициента теплоотдачи через стенку замораживающей колонки между движущимся по ней рассолом (хладоносителем) и замораживаемым породным массивом. Описаны причины рассогласования результатов при использовании различных методов расчета теплоотдачи. Проведен сравнительный анализ коэффициентов теплоотдачи, полученных по различным методам расчета, а также в результате численного трехмерного моделирования течения рассола. Показаны недостатки существующих методов расчета теплоотдачи и определены основные пути дальнейшего совершенствования методов расчета теплоотдачи в условиях коаксиальных замораживающих колонок: учет теплообмена между прямым и обратным потоками рассола в замораживающей колонке, анализ влияния неустановившихся полей скорости и температуры в обратном потоке рассола на начальном участке замораживающей колонки (вблизи башмака колонки), анализ чувствительности величины коэффициента теплоотдачи к отклонению от соосности питающей и замораживающих труб.

Ключевые слова:

Ледопородное ограждение, искусственное замораживание, рассольная схема, теплоотдача, замораживающая колонка, хладоноситель, коэффициент теплоотдачи.

Введение

В настоящее время одним из наиболее распространенных специальных способов строительства вертикальных стволов в сложных геологических и гидрогеологических условиях является искусственное замораживание горных пород [1, 2]. Данный способ заключается в формировании временного защитного ограждения из мерзлой водонасыщенной породы, воспринимающей на себя горное и гидростатическое давление от окружающих незамороженных пород и защищающей строящийся шахтный ствол от попадания в него подземных вод до возведения постоянной крепи и ее гидроизоляции. Формирование защитного ледопородного ограждения (ЛПО) осуществляется с использованием как рассольной [3–6], так и безрассольной [7, 8] схем. При рассольной схеме замораживания по контуру будущего ствола бурят замораживающие скважины, внутри которых располагают колонки, по которым в дальнейшем циркулирует хладоноситель с отрицательной температурой (рис. 1).

Эффективность формирования и поддержания ЛПО зависит от правильности принятых проектных параметров системы замораживания. Одним из наиболее значимых параметров, определяющих скорость формирования ЛПО, наряду с температурой охлаждающего рассола является коэффициент теплоотдачи, величина которого характеризует количество теплоты, которое переходит от породного массива к рассолу через 1 м^2 стенки замораживающей трубы в единицу времени при разности температур $1 \text{ }^\circ\text{C}$ [9]. Коэффициент теплоотдачи зависит от скорости течения рассола в замораживающих колонках, конструкции замораживающих колонок (диаметров питающей и замораживающих труб, отклонения от их соосности), схемы подачи рассола и пр. [10, 11].

При осуществлении непрерывного контроля формирования ЛПО и математической интерпретации данных, измеренных в контрольно-термических скважинах, а также при математическом прогнозировании развития процесса искусственного замораживания в

будущем важно корректно рассчитывать поле температуры и, в частности, корректно подбирать коэффициент теплоотдачи на границе породного массива и замораживающих колонок. В настоящей работе срав-

ниваются и исследуются на предмет корректности существующие подходы и методы расчета коэффициента теплоотдачи для случая замораживающих колонок.

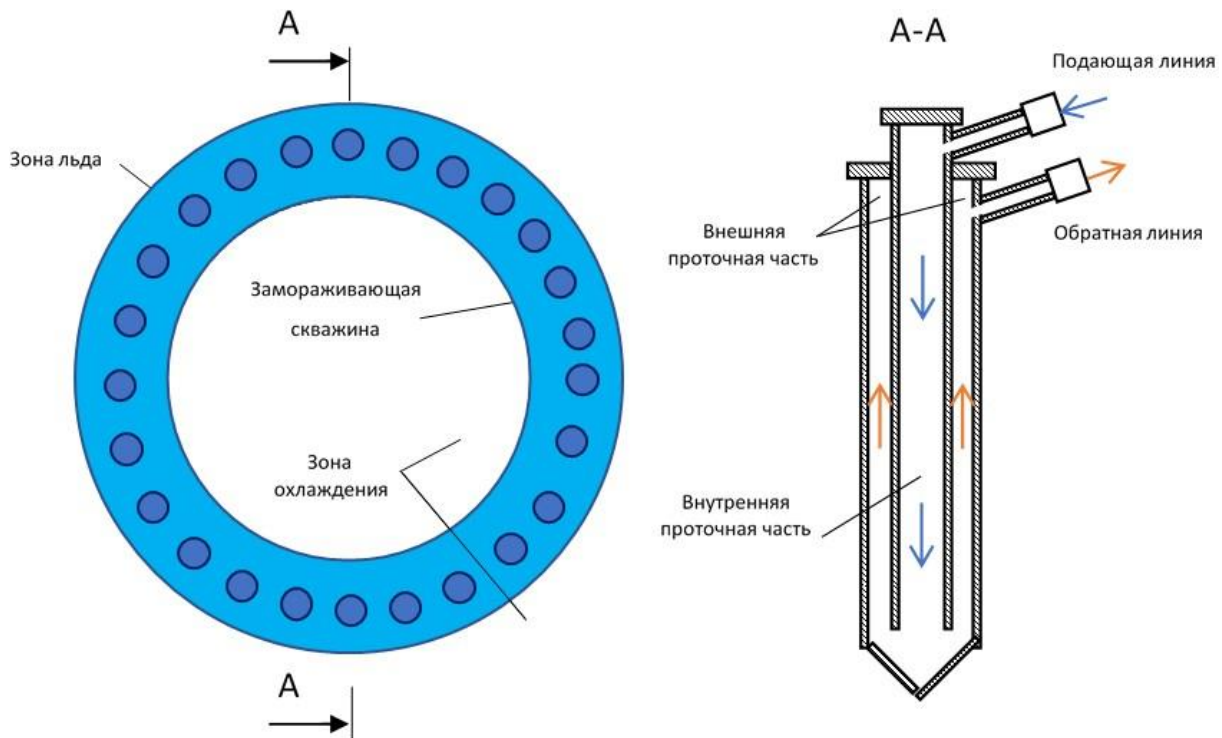


Рис. 1. Контур замораживающих скважин и рассольная схема искусственного замораживания пород
Fig. 1. Freezing pipes circuit and indirect (brine) method of artificial freezing of soils

Основные существующие подходы к расчету коэффициента теплоотдачи

В ранних работах по искусственному замораживанию грунтов и пород [12, 13] теплоотдача на границе замораживающей колонки с массивом моделировалась в предположении о бесконечно большом значении коэффициента теплопередачи от породного массива к хладоносителю в колонках. В этом случае температура массива на границе с замораживающей колонкой в точности равна температуре хладоносителя [14]. Данное допущение существенно облегчало процедуру получения аналитических решений уравнения баланса теплоты в замораживаемом массиве.

В работах [15, 16] рассмотрен другой интересный случай – теплоотдача по граничному условию II рода (на границе массива с замораживающей колонкой задается постоянный тепловой поток). Данное допущение также сделано для того, чтобы получить аналитическое решение, выраженное через функцию ошибок Гаусса (для прямоугольной области) или же интегрально-показательную функцию (для цилиндрической области).

Наиболее общим и правильным подходом к расчету искусственного замораживания является использование закона Ньютона–Рихмана и задание конвективного граничного условия III рода [9, 10]. Так, например, в монографии [9] расчет оттока теплоты от породного массива к хладоносителю,двигающемуся по замораживающим скважинам, основан на законе

Ньютона–Рихмана и связывает тепловой поток q_{12} ($\text{Вт}/\text{м}^2$) через границу между двумя средами – рассолом 1 и породным массивом 2 – с температурами этих сред T_1 и T_2 ($^{\circ}\text{C}$) на границе друг с другом:

$$q_{12} = \alpha(T_1 - T_2). \quad (1)$$

Здесь α – коэффициент теплопередачи от массива через обсадную колонку к замораживающему рассолу, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Этот коэффициент зависит от геометрии замораживающей колонки, скорости и свойств рассола.

В российской литературе по теплофизическим расчетам искусственного замораживания пород расчет коэффициента теплоотдачи осуществляется, как правило, с использованием подхода Н.Г. Трупака [9]. В монографии [9] при определении коэффициента α , присутствующего в (1), рассмотрено только два режима течения – ламинарный и турбулентный. Соответствующие формулы для расчета теплоотдачи в двух режимах течения представлены ниже:

$$\alpha_{\text{лам,1}} = \frac{15\lambda}{d_3} \left(\frac{3600 W d}{a} \right)^{0,23} \left(\frac{L}{d_3} \right)^{-0,5}, \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{лам,2}} = 5,91 \frac{\lambda}{d_3} \left(\frac{3600 P e d}{L} \right)^{0,2}, \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{турб}} = 0,153\lambda \left(\frac{\gamma}{a\mu} \right)^{0,435} \frac{W^{0,87}}{d_3^{0,13}}, \quad (4)$$

где λ – теплопроводность рассола, ккал/(м·ч·°С); $d_3 = d_3 - d_{\text{н}}$ – эффективный гидравлический диаметр, м; d_3 – внутренний диаметр замораживающей трубы, м; $d_{\text{н}}$ – внешний диаметр питающей трубы, м; L – длина трубы, м; W – средняя по сечению трубы скорость рассола, м/с; a – коэффициент температуропроводности рассола, м²/ч; γ – удельный вес рассола, кг/м³; μ – динамическая вязкость рассола, Па·с; Pe – число Пекле.

Следует отметить, что единицы измерения коэффициентов $\alpha_{\text{лам},1}$, $\alpha_{\text{лам},2}$ и $\alpha_{\text{турб}}$ в монографии [9] – ккал/(м²·ч·°С). Ламинарному режиму течения соответствуют числа Рейнольдса $Re < 2100$, в то время как турбулентному – $Re \geq 2100$. Для расчета коэффициента теплоотдачи в ламинарном режиме течения предложено две формулы. Формула (3) применима для замораживающих колонок небольшой глубины (до 120 м [10]), когда начальный участок тепловой стабилизации потока сопоставим с длиной замораживающей колонки и влияет на среднее значение коэффициента теплоотдачи. В то время как формула (2) применима, наоборот, для достаточно длинных замораживающих колонок, на подавляющем протяжении которых поток стабилизирован. В [9] рекомендуется использовать формулу (3) при $3600Pe d_3 > 30L$.

Недостатком такого подхода является отсутствие описания переходного режима течения в диапазоне чисел Рейнольдса от 2300 до 10000, при котором, согласно [17], характер зависимости коэффициента α от чисел Рейнольдса, Прандтля и Пекле принципиально отличен от ламинарного и переходного режимов. Также из формул (2), (3) неясно, есть ли плавный и непрерывный переход между зоной ламинарного течения и зоной турбулентного течения.

В [18] для расчета коэффициента теплоотдачи рассола в замораживающих колонках во всех режимах течения предложена универсальная эмпирическая формула:

$$\alpha_{\text{турб,ср}} = 1,66 \frac{\lambda^{0,682}}{d_3^{0,364}} \left(\frac{3600Wc\gamma}{L} \right)^{0,318}, \quad (5)$$

где c – теплоемкость рассола, ккал/(кг·°С).

В монографии М.А. Михеева [17] предложены формулы для определения среднего безразмерного коэффициента теплоотдачи (числа Нуссельта) при турбулентном и ламинарном режимах течения в результате анализа и обобщения экспериментальных данных:

$$Nu_{\text{турб,ср}} = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25} \varepsilon_L, \quad (6)$$

$$Nu_{\text{лам,ср}} = 1,4 \left(Re \frac{d_3}{L} \right)^{0,4} Pr^{0,3} \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где Re – число Рейнольдса, рассчитанное для эквивалентного гидравлического диаметра в задаче, равного d_3 ; Pr – число Прандтля; $\left(\frac{Pr_a}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25}$ – множитель, учитывающий зависимость физических свойств от температуры и влияние направления теплового потока;

$Pr_{\text{ст}}$ – число Прандтля на стенке замораживающей трубы; ε_L – поправочный коэффициент на случай коротких замораживающих труб (значимость начального участка тепловой стабилизации потока).

Формулы (6), (7) широко распространены в теплотехнике и горной теплофизике для расчетов коэффициента теплоотдачи в трубах кругового сечения.

В работах [19, 20] дана формула для расчета безразмерного коэффициента теплопередачи в коаксиальных трубах в ламинарном и турбулентном режимах течения с использованием ряда экспериментальных измерений:

$$Nu_{\text{лам},1} = 3,96 + 0,9a^{0,5}, \quad (8)$$

$$Nu_{\text{турб}} = \frac{\frac{f}{8} Pe}{1 + 11,7 \sqrt{\frac{f}{8}} (Pr - 1)}, \quad (9)$$

где a – отношение между внешним и внутренним диаметрами трубы (от 0 до 1); f – коэффициент трения.

Формула (8) соответствует случаю теплообмена с внешней стенкой и поддержания постоянной температуры на внешней стенке. Формула (9), являющаяся модификацией формулы Прандтля [21], не зависит от типа граничных условий на внешней стенке трубы. Переход от безразмерного коэффициента теплоотдачи (числа Нуссельта) к соответствующей размерной величине для всех режимов течения осуществляется с помощью формулы:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d_3}. \quad (10)$$

Здесь d_3 – эквивалентный гидравлический диаметр, м.

В работе [22] получена формула для коэффициента теплоотдачи при переходе от ламинарного режима течения к переходному режиму течения на начальном участке тепловой стабилизации потока (большие значения $Pe d_3/L$):

$$Nu_{\text{лам},2} = f_g \sqrt{Pe \frac{d_3}{L}}; \quad (11)$$

$$f_g = 1,615 [1 + 0,14a^{-0,5}]. \quad (12)$$

Здесь f_g – коэффициент трения; a – отношение между внутренним и внешним диаметрами трубы (от 0 до 1); L – длина трубы, м.

В работе [23] предложен еще один вариант формулы для коэффициента теплоотдачи в области переходного режима течения:

$$Nu_{\text{лам},3} = \left(\frac{2}{1 + 22Pr} \right)^{1/6} \sqrt{Pe \frac{d_3}{L}}. \quad (13)$$

В дальнейшем формулы (8), (9) и (11)–(13) были усовершенствованы и обобщены в работах [24–26]. Согласно [26], в ситуации теплообмена рассола только с внешней стенкой замораживающей колонки расчет безразмерного коэффициента теплопередачи в ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения производится по формулам:

$$Nu_{\text{лам},2300} = \left[Nu_{\text{лам},4}^3 + \left(Nu_{\text{лам},5}^3 + Nu_{\text{лам},6}^3 \right) \Big|_{Re \rightarrow 2300} \right]^{1/3}, \quad (14)$$

$$Nu_{\text{лам},4} = 3,66 + 1,2a^{0,5}, \quad (15)$$

$$Nu_{\text{лам},5} = f_g Pe^{1/3} \frac{d_h}{L}, \quad (16)$$

$$Nu_{\text{лам},6} = \left(\frac{2}{1 + 22Pr} \right)^{1/6} \sqrt{Pe \frac{d_h}{L}}, \quad (17)$$

$$Nu_{\text{лам},\text{cp}} = \left[Nu_{\text{лам},4}^3 + Nu_{\text{лам},5}^3 \right]^{1/3}, \quad (18)$$

$$Nu_{\text{турб},10^4} = \frac{\left(\frac{f_{\text{ка}} \Big|_{Re \rightarrow 2300}}{8} \right) 10^4 Pr}{k_1 + 12,7 \sqrt{\frac{f_{\text{ка}} \Big|_{Re \rightarrow 2300}}{8}} \left(Pr^{2/3} - 1 \right)} \times \left[1 + \left(\frac{d_h}{L} \right)^{2/3} \right] F_{\text{ка}}, \quad (19)$$

$$Nu_{\text{турб},\text{cp}} = \frac{\left(\frac{f_{\text{ка}}}{8} \right) Pe}{k_1 + 12,7 \sqrt{\frac{f_{\text{ка}}}{8}} \left(Pr^{2/3} - 1 \right)} \left[1 + \left(\frac{d_h}{L} \right)^{2/3} \right] F_{\text{ка}}, \quad (20)$$

$$F_{\text{ка}} = 0,9 - 0,15a^{0,6}, \quad (21)$$

$$f_{\text{ка}} = \left(1,8 \log_{10} Re^* - 1,5 \right)^{-2}, \quad (22)$$

$$k_1 = 1,07 + \frac{900}{Re} - \frac{0,63}{1 + 10Pr}, \quad (23)$$

$$Re^* = Re \frac{(1 + a^2) \ln a + (1 - a^2)}{(1 - a)^2 \ln a}, \quad (24)$$

$$Nu_{\text{пер},\text{cp}} = (1 - \gamma) Nu_{\text{лам},2300} + \gamma Nu_{\text{турб},10^4}, \quad (25)$$

$$\gamma = \frac{Re - 2300}{7700}, \quad (26)$$

$$Re = \frac{W \rho (d_3 - d_n)}{\eta}. \quad (27)$$

Здесь $f_{\text{ка}}$ – коэффициент трения, соответствующий ситуации течения в коаксиальном канале; $F_{\text{ка}}$ – корреляционный коэффициент для случая теплоотдачи только через замораживающую трубу; $Nu_{\text{лам},\text{cp}}$ и $Nu_{\text{турб},\text{cp}}$ – средние числа Нуссельта в ламинарном и турбулентном режимах течения соответственно; $Nu_{\text{лам},2300}$ и $Nu_{\text{турб},10^4}$ – пограничные числа Нуссельта, используемые для расчета среднего числа Нуссельта $Nu_{\text{пер},\text{cp}}$ в переходной области.

В отличие от (2)–(4), ламинарный режим течения соответствует числам Re в диапазоне от 0 до 2300, а турбулентный режим течения – числам $Re > 10^4$. Принципиальной особенностью данной методики является пренебрежение теплообменом через обсадную колонну между прямым и обратным потоками рассола. Учесть данный теплообмен в рамках классических методик по расчету коэффициентов теплоотдачи не представляется возможным, поскольку традиционно

рассматривается только три типа граничных условий [20, 26, 27]:

- теплообмен или тепловой поток на внешней стенке;
- теплообмен или тепловой поток на внутренней стенке;
- равный теплообмен или тепловой поток на обеих стенках.

Еще одним недостатком этого метода, как и других известных в литературе методов, является неучет отклонений от соосности питающей и замораживающих труб [8]. Чаще всего данный фактор является неопределенным и не может быть измерен в практических условиях. Однако важно понимать степень влияния отклонения от соосности на величину коэффициента теплоотдачи.

В случае, когда течение рассола в вертикальной замораживающей колонке происходит в ламинарном режиме, возникает дополнительный фактор – действие гравитационных сил. Ввиду данного фактора режимы ламинарного течения в замораживающих колонках подразделяются на вязкостный и вязкостно-гравитационный [10, 17]. Ключевыми критериями здесь обычно являются числа Рэлея и Рейнольдса. Так, в работе [28] при $Ra > 8 \cdot 10^5$ предлагается рассматривать вязкостно-гравитационный режим течения рассола. В работе [10] выделяется четыре различных вида течений по направленности потока (вверх-вниз) и длине труб (достижение или недостижение тепловой и гидравлической стабилизации), представлены соответствующие формулы с эмпирическими коэффициентами. Фактор гравитационных сил может оказаться важным при расчете искусственного замораживания пород с помощью замораживающих колонок. Однако данный фактор, как правило, не учитывается в работах по искусственному замораживанию [9, 29] либо учитывается приближенно [10]. В методе (14)–(27) данный фактор также не учитывается. При этом в настоящей статье мы не будем его рассматривать. Это связано с желанием провести анализ основных существующих подходов к расчету коэффициента теплоотдачи с учетом только той физики, которая в них была заложена изначально (т. е. учет различной развитости режимов течения и различной стабилизированности теплообмена потока со стенкой).

В целом также следует отметить, что более корректное определение коэффициентов теплоотдачи в рамках более детализированных математических моделей тепловых процессов в движущемся рассоле возможно только посредством проведения двух- и трехмерного численного моделирования неизотермического течения рассола во внутренней и внешней проточных областях замораживающей колонки.

Сравнительный анализ методов расчета коэффициентов теплоотдачи

Сравнительный анализ основных описанных выше методов расчета коэффициента теплоотдачи представлен ниже для условий системы замораживания при строительстве стволов рудника Нежинского Горно-обогатительного комбината (ГОК) (рис. 2), а также

для условий системы замораживания при строительстве стволов рудника Гремячинского ГОК (рис. 3). Рассмотрены методы Н.Г. Трупака (2)–(4), ВНИИОМШС (5) и В. Гнилинского (14)–(27). Параметры систем замораживания, использованные при проведении численных расчетов, представлены в табл. 1, 2. Разница между двумя рассматриваемыми системам замораживания состоит в существенно разных длинах замораживающих колонок и существенно различных значениях динамической вязкости используемых рассолов.

Таблица 1. Теплофизические и геометрические параметры системы замораживания рудника Нежинского ГОК

Table 1. Thermophysical and geometric parameters of the freezing system for the shafts of the Nezhinsky Mining and Processing Plant

Параметр Parameter	Значение Value
Внутренний диаметр замораживающей трубы, м Freezing pipe inner diameter, m	0,146
Внешний диаметр питающей трубы, м Supply pipe outer diameter, m	0,1
Длина замораживающей колонки, м Freezing column length, m	160
Содержание соли CaCl ₂ в рассоле, % Salt CaCl ₂ content in brine, %	29,4
Динамическая вязкость рассола, Па·с Brine dynamic viscosity, Pa·s	0,0212
Плотность рассола, кг/м ³ /Brine density, kg/m ³	1280
Удельная теплоемкость рассола, Дж/(кг·°C) Brine specific heat capacity, J/(kg·°C)	2659
Теплопроводность рассола, Вт/(м·°C) Brine thermal conductivity, W/(m·°C)	0,49
Число Прандтля/Prandtl number	0,7

Таблица 2. Теплофизические и геометрические параметры системы замораживания рудника Гремячинского ГОК

Table 2. Thermophysical and geometrical parameters of the freezing system of the shafts of Gremyachinsky Mining and Processing Plant

Параметр Parameter	Значение Value
Внутренний диаметр замораживающей трубы, м Freezing pipe inner diameter, m	0,125
Внешний диаметр питающей трубы, м Supply pipe outer diameter, m	0,086
Длина замораживающей колонки, м Freezing column length, m	827
Тип рассола/Brine type	Tyfoxit F50
Динамическая вязкость рассола, Па·с Brine dynamic viscosity, Pa·s	0,0032
Плотность рассола, кг/м ³ /Brine density, kg/m ³	1358
Удельная теплоемкость рассола, Дж/(кг·°C) Brine specific heat capacity, J/(kg·°C)	2570
Теплопроводность рассола, Вт/(м·°C) Brine thermal conductivity, W/(m·°C)	0,405
Число Прандтля/Prandtl number	0,7

На рис. 2, 3 представлены зависимости размерных коэффициентов теплоотдачи от скорости рассола во внешней проточной области для обоих рассматриваемых случаев. Коэффициенты теплоотдачи приведены к единым размерностям, соответствующим систе-

ме СИ. Эквивалентный гидравлический диаметр во всех случаях считался как разница между внутренним диаметром замораживающей трубы и внешним диаметром питающей трубы. Ось y на обоих графиках имеет логарифмическую шкалу. Непрерывными линиями показаны результаты по аналитическим формулам, точками – результаты численного моделирования теплоотдачи от породного массива к рассолу, выполненного в программном комплексе Ansys Fluent авторами работы. В численной модели расчет размерного коэффициента теплоотдачи производится не по формуле (10), а исходя из вычисленного перепада температур на отрезке замораживающей колонки с помощью формулы:

$$\alpha = \frac{\rho W S \Delta T}{PL(T_{ст} - T_0)} \quad (28)$$

Здесь S – площадь поперечного сечения внешней проточной части замораживающей колонки, м²; P – периметр внешней стенки замораживающей колонки, м; L – длина участка, м; ΔT – рассчитанный перепад температур на этом участке, °C; T_0 – начальная температура рассола, °C; $T_{ст}$ – температура стенок, °C.

Численный расчет основан на решении системы балансовых уравнений (усредненных по Рейнольдсу) для массы, импульса и энергии. Замыкание системы уравнений осуществлялось с помощью двухпараметрической модели турбулентности SST k - ω . Рассматривалась ситуация установившегося течения рассола по замораживающей колонке в трехмерном случае. Ввиду наличия пространственной осевой симметрии в задаче рассматривалась одна четвертая часть внешнего проточного сечения замораживающей колонки. Теплообмен с питающей трубой и смещение этой трубы в горизонтальной плоскости не рассматривались.

На входе задавалось граничное условие в виде однородного поля скоростей рассола, а на выходе – нулевое статическое давление. На границах симметрии задавался нулевой поток всех величин через границу симметрии. На твердых стенках колонки задавалось прилипание потока. Шероховатость не учитывалась.

На предварительном этапе моделирования было построено несколько конечно-объемных сеток для проверки независимости решения от способа дискретизации расчетного домена. Во внутренних узлах расчетной области строилась нерегулярная тетраэдрическая сетка, а на стенках задавался призматический пограничный слой. Его толщина выбиралась исходя из расчетного значения параметра Y^+ . Величина параметра Y^+ контролировалась таким образом, чтобы его среднее значение на стенках исследуемого участка замораживающей колонки не превышало значение 3,0.

Из рис. 2, 3 видно, что расхождение между всеми тремя методами расчета коэффициента теплоотдачи существенно: в ламинарной зоне максимальное расхождение между кривыми составляет более 50 %, а в турбулентной зоне коэффициенты теплоотдачи могут отличаться на порядок.

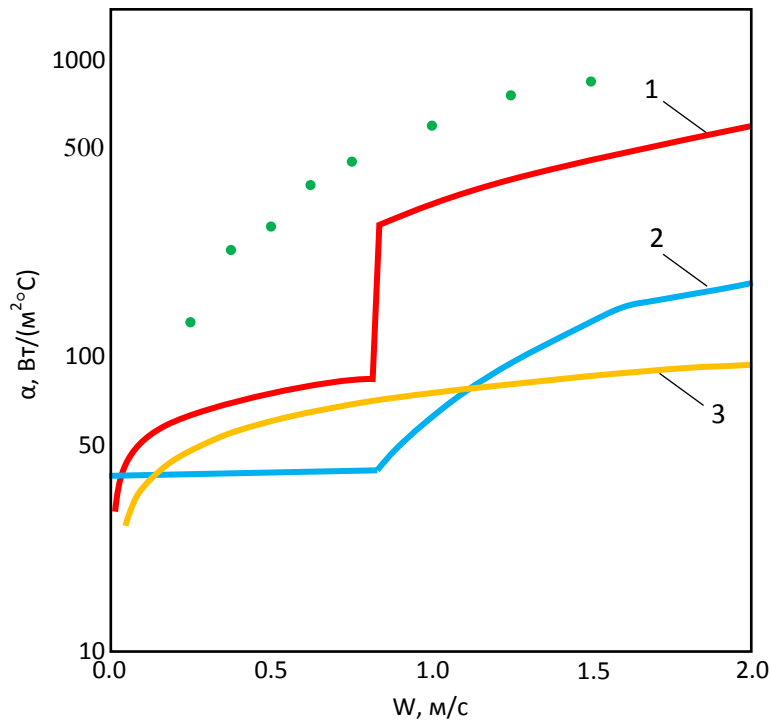


Рис. 2. Зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости движения рассола для системы замораживания рудника Нежинского ГОК: 1 – метод Н.Г. Трупака, 2 – метод В. Гнилинского, 3 – метод ВНИИОМШС, точки – результат численного моделирования

Fig. 2. Dependences of the heat transfer coefficient on the velocity of brine movement for the freezing system in shafts of the Nezhinsky Mining and Processing Plant: 1 – N.G. Trupak method, 2 – V. Gnilinsky method, 3 – VNIOMShS method, points – the result of numerical modeling

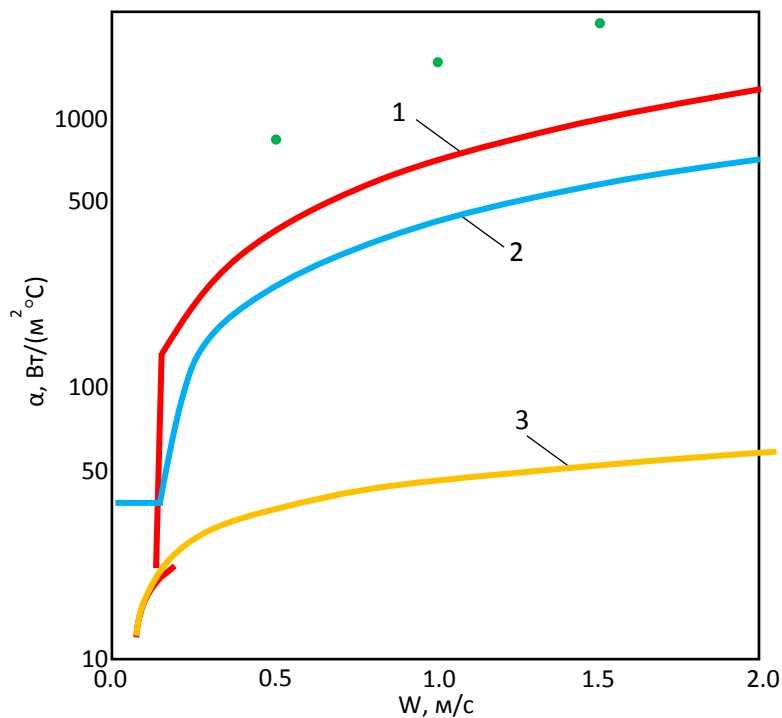


Рис. 3. Зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости движения рассола для системы замораживания рудника Гремячинского ГОК, точки – результат численного моделирования

Fig. 3. Dependences of the heat transfer coefficient on the velocity of the brine movement for the freezing system in shafts of the Gremyachinsky Mining and Processing Plant, points – the result of numerical simulation

В основном это связано с заниженной величиной коэффициента теплоотдачи, получаемой по формуле (5) ВНИИОМШС. Для метода Н.Г. Трупака на кривых α - W присутствует скачок при переходе от формулы ламинарного (2) к формуле турбулентного (4) режима течения. Этот разрыв может быть устранен при использовании сглаженного перехода от (2) к (4) с использованием зависимости аналогичной (25), (26). Если в рамках метода Н.Г. Трупака коэффициент теплоотдачи в ламинарной зоне ощутимо меняется с ростом Re , то в рамках метода В. Гнилинского коэффициент теплоотдачи в ламинарной зоне является практически постоянным и не зависящим от скорости рассола. Такое качественно разное поведение кривых в ламинарной зоне обусловлено, по видимому, тем, что в методе Н.Г. Трупака в ламинарном режиме течения для обеих формул влияния начального участка тепловой стабилизации потока на величину коэффициента теплоотдачи является ощутимым – для формулы (3) в большей степени, а для формулы (2) в меньшей.

Примечательно, что все три метода расчета (Н.Г. Трупака, ВНИИОМШС, В. Гнилинского) дают более низкий коэффициент теплоотдачи, чем по результатам численного моделирования. Наиболее близким к результатам численного моделирования является метод Н.Г. Трупака (2)–(4), однако даже в рамках этого метода коэффициент теплоотдачи всюду ниже, чем соответствующее ему значение, рассчитанное численно. Их относительная разница для определенных скоростей превышает 50 %. При этом из рис. 3, а видно, что переходный режим течения между ламинарной и турбулентной зонами в рамках численной модели лежит в диапазоне скоростей рассола 0,5–0,7 м/с, в рамках метода Н.Г. Трупака переход происходит при скорости ~0,8 м/с, а в рамках метода В. Гнилинского – в диапазоне скоростей от 0,8 до 1,6 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иудин М.М. Обеспечение безопасности устойчивости ствола при оттаивании ледопородного ограждения // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2009. – Т. 6. – № 1. – С. 46–50.
2. Artificial ground freezing: a review of thermal and hydraulic aspects / M.A. Alzoubi, M. Xu, F.P. Hassani, S. Poncet, A.P. Sasmito // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2020. – V. 104. – P. 103–109.
3. Левин Л.Ю., Семенов М.А., Паршаков О.С. Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – № 5. – С. 268–274.
4. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов / Л.Ю. Левин, И.И. Головатый, Д.А. Диудин, О.С. Паршаков // Горный журнал. – 2018. – Т. 9. – № 8. – С. 48–53.
5. Левин Л.Ю., Семенов М.А., Паршаков О.С. Математическое прогнозирование толщины ледопородного ограждения при проходке стволов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – Т. 78. – № 5. – С. 154–161.
6. Левин Л.Ю., Колесов Е.В., Семенов М.А. Исследование динамики ледопородного ограждения в условиях повреждения за-

Заключение

Несмотря на многообразие существующих в практике методов расчета коэффициента теплоотдачи в трубах с кольцевыми сечениями, использование данных методов для расчета теплоотдачи от породного массива к рассолу через стенку замораживающих колонок при рассольном способе замораживания не всегда корректно. Существующие на сегодняшний день методы расчета коэффициента теплоотдачи плохо согласуются между собой и включают в себя ряд допущений, обоснованность которых для рассматриваемой задачи не исследовалась должным образом.

В частности, представляет интерес проведение дальнейших исследований влияния на величину коэффициента теплоотдачи таких факторов, как:

- теплообмен между прямым и обратным потоками рассола в замораживающих колонках;
- влияние неустановившихся полей скорости и температуры в обратном потоке рассола на начальном участке замораживающей колонки (вблизи башмака колонки);
- чувствительность величины коэффициента теплоотдачи к отклонению от соосности питающей и замораживающих труб.

Кроме того, важно получить решение, обеспечивающее гладкое сопряжение функциональных зависимостей коэффициента теплоотдачи от скорости потока рассола для ламинарного и турбулентного режимов течения.

По мнению авторов статьи, решение указанных задач может быть достигнуто путем проведения многопараметрического моделирования течений рассола в замораживающих колонках с использованием методов вычислительной динамики жидкости и газа, а также лабораторных исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках проекта Международных исследовательских групп (соглашение № С-26/563).

7. Николаев П.В., Шуплик М.Н. Математическое моделирование процесса искусственного замораживания грунтов с применением твердого диоксида углерода // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – Т. 27. – № 11. – С. 257–265.
8. Liu S., Li X., Wang D. Numerical simulation of the coal temperature field evolution under the liquid nitrogen cold soaking // Arabian Journal of Geosciences. – 2020. – V. 13. – Статья № 1215.
9. Трупаков Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. – М.: Изд-во «Углетехиздат», 1954. – 896 с.
10. Насонов И.Д., Щуплик М.Н. Закономерности формирования ледопородных ограждений при сооружении стволов шахт. – М.: Изд-во «Недра», 1976. – 237 с.
11. A study on heat-carrying capacity of brine on development of frozen soil in artificial ground freezing model testing / R.C. Huang, M. Chang, Y.S. Lin, B.Y. Liu // Proc. of the 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Taipei, Taiwan, 2019. – V. 10. – P. 1–4.
12. Лейбензон Л.С. К вопросу о затвердевании земного шара из первоначального расплавленного состояния // Изв. АН СССР. Серия географ. и геофиз. наук. – 1939. – № 6. – С. 625–661.

13. Хакимов Х.Р. Замораживание грунтов в строительных целях. – М.: Изд-во «Госстройиздат», 1962. – 188 с.
14. Thermal and hydraulic analysis of selective artificial ground freezing using air insulation: experiment and modeling / A. Zueter, A. Nie-Rouquette, M.A. Alzoubi, A.P. Sasmito // Computers and Geotechnics. – 2020. – V. 120. – P. 66–69.
15. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Изд-во «Наука», 1964. – 488 с.
16. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1967. – 600 с.
17. Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М.: Изд-во ГЭИ, 1956. – 390 с.
18. Временное руководство по проектированию процесса замораживания пород для проходки вертикальных стволов шахт. – Харьков: Изд-во ВНИИОМШС, 1971. – 101 с.
19. Петухов Б.С. Теплообмен в ядерных энергетических установках / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев и др. 3-е изд., перераб и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 548 с.
20. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. – М.: Изд-во «Энергия», 1967. – 409 с.
21. Prandtl L. Führer durch die Strömungslehre, Braunschweig. – Germany: Verlag Vieweg, 1965. – 523 p.
22. Stephan K. Wärmeübergang bei turbulenter und laminarer Strömung in Ringspalten // Chem-Ing-Techn. – 1962. – V. 34. – P. 207–212.
23. Operational behaviour and heat transfer in a thermosiphon desorber at sub-atmospheric pressure. P. I: The model / Q.D. Trinh, T.A. Vu, J. Albers, F. Ziegler // International Journal of Refrigeration. – 2019. – V. 108. – № 5. – P. 246–257.
24. Gnielinski V. On heat transfer in tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – V. 63. – P. 134–140.
25. Gnielinski V. Heat transfer coefficients for turbulent flow in concentric annular ducts // Heat Transfer Engineering. – 2009. – V. 6. – P. 431–436.
26. Gnielinski V. G2 heat transfer in concentric annular and parallel plate ducts // VDI Heat Atlas. – 2010. – V. 15. – P. 701–708.
27. Field experiment and stochastic model of uncertain thermal processes of artificial frozen wall around multi-circle freezing pipe / T. Wang, G. Zhou, D. Xu, D. Wang, J. Wang // International Journal of Thermal Sciences. – 2021. – V. 160. – P. 106–118.
28. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
29. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities / M. Vitel, A. Rouabhi, M. Tijani, F. Guérin // Computers and Geotechnics. – 2015. – V. 63. – P. 99–111.

Поступила: 09.11.2021 г.

Информация об авторах

Семина М.А., кандидат технических наук, научный сотрудник Горного института УрО РАН.

Головатый И.И., генеральный директор ОАО «Беларуськалий».

Бородавкин Д.А., младший научный сотрудник Горного института УрО РАН.

UDC 622.253.35

ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING HEAT TRANSFER BETWEEN BRINE IN THE FREEZING PIPES AND SURROUNDING SOILS

Mikhail A. Semin¹,
seminma@inbox.ru

Ivan I. Golovaty²,
belaruskali.office@kali.by

Dmitry A. Borodavkin¹,
borodavkin.dmitriy@gmail.com

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

² JSC «Belaruskali»,
5, Korzh street, Soligorsk, 223710, Republic of Belarus.

The relevance of the study follows from the high demand for artificial freezing of soils in sinking vertical mine shafts. Analysis of methods for calculating heat transfer between brine in freezing columns and surrounding soil makes it possible to further improve the methods for calculating heat transfer coefficients. The research results will be useful for designing freezing systems in shaft construction.

The main aim of the research is to analyze the existing methods for calculating heat transfer between the coolant in the freezing column and the surrounding rocks, to determine the main ways to further improve the methods for calculating heat transfer in conditions of coaxial freezing columns

Objects: the system «brine – freezing pipe – frozen soil».

Methods: comparative analysis of existing methods for calculating heat transfer, numerical simulation in the Ansys Fluent software package.

Results. The authors have carried out the comparative analysis of the existing approaches and methods for calculating the heat transfer coefficient through the wall of the freezing pipe between the brine (coolant) moving along it and the frozen soil. The paper describes the reasons for discrepancy between the results when using various methods for calculating heat transfer. The authors have carried out the comparative analysis of the heat transfer coefficients obtained by various calculation methods, as well as as a result of numerical three-dimensional modeling of the brine flow. The drawbacks of the existing methods for calculating heat transfer are shown and the main ways of further improving the methods for calculating heat transfer under conditions of coaxial freezing columns are determined: taking into account heat transfer between the forward and reverse brine flows in the freezing columns, analyzing the effect of transient velocity and temperature fields in the reverse brine flow at the initial section of the freezing column (near the column shoe), analysis of the sensitivity of the value of the heat transfer coefficient to deviation from the alignment of the supply and freezing pipes.

Key words:

Frozen wall, artificial freezing, indirect freezing, heat transfer, freezing pipe, brine, heat transfer coefficient.

The research was financially supported by the Administration of Perm region within the project of International research groups (agreement no. C-26/563).

REFERENCES

- Iudin M.M. Ensuring the stability of the trunk during the thawing of the ice wall. *Bulletin of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov*, 2009, vol. 1, pp. 46–50. In Rus.
- Alzoubi M.A., Xu M., Hassani F.P., Poncet S., Sasmito A.P. Artificial ground freezing: a review of thermal and hydraulic aspects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 104, pp. 103–109.
- Levin L.Yu., Semin M.A., Parshakov O.S. Improving methods of frozen wall state prediction for mine shafts under construction using distributed temperature measurements in test wells. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, no. 13, pp. 268–274.
- Levin L.Yu., Golovaty I.I., Diulin D.A., Parshakov O.S. Optimization of frozen wall formation in shaft construction. *Gornyi zhurnal*, 2018, no. 8, pp. 48–53. In Rus.
- Levin L.Yu., Semin M.A., Parshakov O.S. Mathematical Prediction of Frozen Wall Thickness in Shaft Sinking. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 938–944. In Rus.
- Levin L.Yu., Kolesov E.V., Semin M.A. Investigation of the dynamics of the ice wall under conditions of damage to the freezing columns during sinking of mine shafts. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2016, vol. 11, pp. 257–265. In Rus.
- Nikolaev P.V., Shuplik M.N. Mathematical modeling of the process of artificial freezing of soils with the use of solid carbon dioxide. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, vol. 11, pp. 243–251. In Rus.
- Liu S., Li X., Wang D. Numerical simulation of the coal temperature field evolution under the liquid nitrogen cold soaking. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, art. no. 1215.
- Trupak N.G. *Zamorazhivanie gornyykh porod pri prokhozke stvolov* [Freezing of rocks during shaft sinking]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1954. 896 p.
- Nasonov I.D., Shchuplik M.N. *Zakonomernosti formirovaniya ledopородnykh ograzhdeniy pri sooruzhenii stvolov shakht* [Regularities of the formation of ice walls during the construction of mine shafts]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 237 p.
- Huang R.C., Chang M., Lin Y.S., Liu B.Y. A study on heat-carrying capacity of brine on development of frozen soil in artificial ground freezing model testing. *Proc. of the 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Taipei, Taiwan, 2019. Vol. 10, pp. 1–4.
- Leibenzon L.S. On the question of the solidification of the globe from the initial molten state. *Izv. Academy of Sciences of the USSR. A series of geographers and geophysicists. Sciences*, 1939, vol. 6, pp. 625–661. In Rus.
- Khakimov Kh.R. *Zamorazhivanie gruntov v stroitelnykh tselyakh* [Freezing of soils for construction purposes]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1962. 188 p.

14. Zueter A., Nie-Rouquette A., Alzoubi M.A., Sasmito A.P. Thermal and hydraulic analysis of selective artificial ground freezing using air insulation: experiment and modeling. *Computers and Geotechnics*, 2020, vol. 120, pp. 66–69.
15. Carslow G., Jaeger D. *Teploprovodnost tverdykh tel* [Thermal conductivity of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 488 p.
16. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Heat conduction theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p.
17. Mikheev M.A. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. Moscow, SEI Publ. house, 1956. 390 p.
18. *Vremennoe rukovodstvo po proektirovaniyu protsessa zamorazhivaniya porod dlya prokhodki vertikalnykh stvolov shakht* [Interim guidance on the design of the process of freezing rocks for sinking vertical shafts]. Kharkov, VNIOMShS Publ., 1971. 101 p.
19. Petukhov B.S. *Teploobmen v yadernykh energeticheskikh ustanovkakh* [Heat exchange in nuclear power plants]. Moscow, MPEI Publ. house, 2003. 548 p.
20. Petukhov B.S. *Teploobmen i soprotivlenie pri laminarnom techenii zhidkosti v trubakh* [Heat transfer and resistance in laminar flow of liquid in pipes]. Moscow, Energiya Publ., 1967. 409 p.
21. Prandtl L. *Führer durch die Strömungslehre*, Braunschweig [Fluid Mechanics Guide]. Braunschweig, Germany, Verlag Vieweg, 1965. 523 p.
22. Stephan K. Wärmeübergang bei turbulenter und laminarer Strömung in Ringspalten [Heat transfer in turbulent and laminar flow in annular tubes]. *Chem -Ing -Techn.*, 1962, vol. 34, pp. 207–212.
23. Trinh Q.D., Vu T.A., Albers J., Ziegler F. Operational behaviour and heat transfer in a thermosiphon desorber at sub-atmospheric pressure. P. I: The model. *International Journal of Refrigeration*, 2019, vol. 108, no. 3, pp. 246–257.
24. Gnielinski V. On heat transfer in tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 63, pp. 134–140.
25. Gnielinski V. Heat transfer coefficients for turbulent flow in concentric annular ducts. *Heat Transfer Engineering*, 2009, vol. 6, pp. 431–436.
26. Gnielinski V. G2 heat transfer in concentric annular and parallel plate ducts. *VDI Heat Atlas*, 2010, vol. 15, pp. 701–708.
27. Wang T., Zhou G., Xu D., Wang D., Wang J. Field experiment and stochastic model of uncertain thermal processes of artificial frozen wall around multi-circle freezing pipe. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, vol. 160, pp. 106–118.
28. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 488 p.
29. Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 63, pp. 99–111.

Received: 9 November 2021.

Information about the authors

Mikhail A. Semin, Cand. Sc., researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Ivan I. Golovaty, general director, JSC «Belaruskali».

Dmitry A. Borodavkin, junior researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.