

УДК 622.23.05+004.942+519.876.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО
ПРОЦЕССА ПРИ ТЕРМОАДГЕЗИОННОМ
ОТБОРЕ И ИЗВЛЕЧЕНИИ ЗЕРЕН
ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДЯЩЕГО
МАТЕРИАЛА ИЗ КОНЦЕНТРАТА

Н. П. Старостин,
П. П. Шарин О. А. Аммосова

Аннотация. Для повышения производительности установки термоадгезионного отбора и извлечения алмазного сырья из концентрата используется численное моделирование динамики температурного поля при кратковременном контакте ролика-нагревателя с зерном алмаза, движущимся на транспортной ленте в желобе со слоем термоадгезионного вещества. Предложена методика расчетного определения в установке ширины контактного края ролика-нагревателя, обеспечивающей закрепление алмазов заданной размерности в термоадгезионном веществе, основанная на анализе динамики температурного поля в системе «нагревательный элемент — алмаз — термоадгезионное вещество». Закрепление алмаза обеспечивается при оплавлении термоадгезионного вещества на определенную глубину за время теплового контакта алмаза с роликом-нагревателем. По предложенной методике рассчитаны ширины контактного края роликов-нагревателей, необходимые для реализации в установке эффективного извлечения алмаза из смеси сопутствующих минералов по трем потокам на транспортной ленте.

DOI: 10.25587/SVFU.2020.69.70.008

Ключевые слова: алмазы, термоадгезионный метод, канифоль, извлечение алмазов, метод конечных элементов, фазовый переход, площадь контакта.

Введение

В настоящее время алмазодобыча является одним из прибыльных секторов не только российской, но мировой экономики. Однако за последние двадцать лет в мире не открыто ни одного крупного коренного месторождения алмазов, что заставляет алмазодобывающие компании обратить внимание на разработку и внедрение эффективных технологий обогащения и извлечения алмазов из алмазосодержащих руд и песков на разрабатываемых месторождениях. Одной из

Работа выполнена в рамках Госзаказа (проект № АААА-А17-1170407100380-8 от 07.04.2017 г.).

перспективных и эффективных технологий отбора и извлечения алмазов является термоадгезионный метод сепарации. Суть термоадгезионного метода сепарации алмазов заключается в контактной передаче тепла от нагревателя через зерна, смеси сортируемых минералов, к слою термоадгезионного вещества, где зерна алмаза, обладающие высокой теплопроводностью, закрепляются, а зерна других минералов, имеющие низкую теплопроводность, чем зерна алмаза, не прикрепляются.

При практической реализации метода термоадгезионной сепарации алмазов наиболее целесообразно использование следующей схемы. Зерна алмазосодержащего концентрата узкого класса размерности подаются на движущуюся транспортерную ленту, на которой на всю ее ширину сформирован параллельный ряд продольных треугольных желобов (каналов), на поверхности которых нанесен тонкий слой термоадгезионного вещества. В качестве термоадгезионного вещества используется природный полимерный материал — канифоль, имеющая температуру плавления 50–130 °С и короткое время стеклования. Над каждым желобом вдоль их продольной оси устанавливаются вращающиеся навстречу потоку зерен ролики-нагреватели так, чтобы их рабочие диски находились вдоль продольной оси желобов. При этом каждый ролик-нагреватель имеет независимую подвеску, позволяющую приподниматься при наезде на зерна и опускаться при съезде с них, что нивелирует незначительную разницу в форме и размерах зерен и обеспечивает надежный тепловой контакт. При заданной скорости движения транспортерной ленты температуру роликов-нагревателей устанавливают так, чтобы только под зернами алмазов происходило расплавление тонкого слоя термоадгезионного вещества с закреплением их в желобах транспортерной ленты. Зерна других минералов вследствие их низкой теплопроводности при заданных температурно-временных условиях не расплавляют под собой термоадгезионный слой и не прикрепляются; они далее перемещаются лентой и сбрасываются в приемник пустой породы.

Однако количество тепла, проходящего через зерна к термоадгезионному слою, при заданной разнице температуры нагревателя и температуры расплавления термоадгезионного слоя зависит не только от коэффициентов теплопроводности, но и продолжительности контакта, площади контактной зоны зерен с нагревателем, а также от размеров и формы зерен минералов, что необходимо учитывать при разработке конструкции установки-сепаратора. При этом определение параметров функциональных узлов сепаратора, ответственных за избирательное извлечение алмазов из смеси зерен сопутствующих минералов, требует расчета и анализа процессов теплопередачи нагреватель — алмаз (минерал) — термоадгезионное вещество.

Настоящая работа посвящена численному моделированию процессов теплопередачи, происходящих при работе термоадгезионного сепаратора, для оценки

и определения его функциональных параметров и оптимальных режимов работы.

Постановка задачи

В работе [1] проведены оценочные расчеты теплопередачи в схеме «нагревательный элемент — алмаз (минерал) — термоадгезионное вещество». Для совершенствования установки термоадгезионного отбора и извлечения алмазного сырья необходимо проведение более детальных 3D расчетов динамики температурного поля в такой же схеме. Для упрощения математического моделирования примем следующие допущения: алмаз имеет форму шара; зона теплового контакта алмаза и ролика-нагревателя представляет собой сегмент сферы с диаметром основания, равным ширине контактного края ролика, и считается неподвижной. Температура в зоне контакта T_{ph} постоянна. На рис. 1 представлена расчетная модель зерна алмаза и слоя термоадгезионного вещества в желобе транспортной ленты.

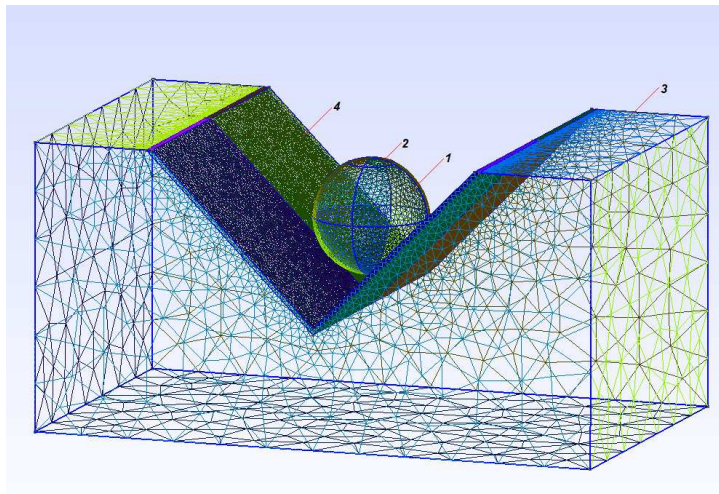


Рис. 1. Расчетная модель: 1 — алмаз; 2 — зона контакта алмаза с роликом-нагревателем; 3 — транспортная лента; 4 — слой термоадгезионного вещества.

При скорости ленты V продолжительность контакта t_k алмаза с роликом-нагревателем определяется по формуле

$$t_k = \frac{2r}{V} \sqrt{1 - \left(\frac{R-h}{r-R} \right)^2}, \quad (1)$$

где r , R — радиусы алмаза и ролика-нагревателя, h — расстояние от вершины желоба до центра алмаза.

Задача состоит в определении для алмаза заданной размерности минимальной ширины контактного края ролика-нагревателя (диаметра основания зоны теплового контакта), обеспечивающей оплавление термоадгезионного вещества на определенную глубину за время, равное продолжительности контакта t_k . При выполнении такого условия зерна алмаза меньшей размерности будут закреплены в желобе транспортной ленты.

Нестационарное температурное поле в алмазе и транспортной ленте со слоем термоадгезионного вещества описывается уравнением теплопроводности:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T), \quad x \in D, \quad 0 < t \leq t_m, \quad (2)$$

где T — температура, C — объемная теплоемкость, λ — коэффициент теплопроводности, x — пространственная переменная; D — расчетная область, t — время; t_m — время расчета.

На свободных поверхностях Γ тел задается условие конвективного теплообмена:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \alpha(T - T_{amb}), \quad (3)$$

где α — коэффициент теплообмена, T_{amb} — температура окружающего воздуха, n — вектор нормали к поверхности Γ в точке.

На торцах Γ_1 расчетного участка транспортной ленты вследствие их удаленности от теплового источника задается условие отсутствия теплового потока:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = 0. \quad (4)$$

В зоне контакта алмаза с роликом-нагревателем задается условие первого рода с температурой нагревателя T_H :

$$T_{\Gamma_T} = T_H. \quad (5)$$

Для учета скрытой теплоты фазового перехода Q при оплавлении термоадгезионного вещества в уравнении используются эффективные коэффициенты объемной теплоемкости и теплопроводности:

$$\tilde{C} = \begin{cases} C_1 \rho_1, & T < T_{\Phi} - \Delta, \\ 0,5(C_1 \rho_1 + C_2 \rho_2) + \frac{Q\rho}{2\Delta}, & T_{\Phi} - \Delta \leq T \leq T_{\Phi} + \Delta, \\ C_2 \rho_2, & T > T_{\Phi} + \Delta; \end{cases}$$

$$\tilde{\lambda} = \begin{cases} \lambda, & T < T_{\Phi} - \Delta, \\ 0,5(\lambda_1 + \lambda_2), & T_{\Phi} - \Delta \leq T \leq T_{\Phi} + \Delta, \\ \lambda_2, & T > T_{\Phi} + \Delta, \end{cases}$$

где C , λ , ρ — теплоемкость, теплопроводность и плотность вещества, индекс 1 для твердой, 2 — жидкой фаз, T_{Φ} — температура фазового перехода. Таким образом, коэффициенты для термоадгезионного вещества становятся зависящими от температуры, а уравнение (2) квазилинейным.

Для решения поставленной задачи используется метод конечных элементов (МКЭ), который успешно применяется для реализации различных прикладных проблем [2–4]. Численное моделирование проводится с использованием программы свободного доступа Dolfin/FEniCS [5]. Геометрия и триангуляция расчетной области строилась с использованием программы GMSH [6]. Визуализация полученных результатов расчетов проводилась с помощью программы ParaView [7]. Аппроксимация по времени проводилась с использованием неявной схемы [8]. Для решения задачи (2)–(5) МКЭ рассматривается вариационная задача нахождения функции T , удовлетворяющей условию (5) и уравнению [9]:

$$a(T, v) = f(v), \quad T \in U, \quad v \in V, \quad (6)$$

где

$$a(T, v) = \frac{1}{\tau} \int_D C(T^n) T^{n+1} v \, dx + \int_D (\lambda(T^n) \operatorname{grad} T^{n+1}, \operatorname{grad} v) \, dx + \int_\Gamma \alpha T v \, d\gamma, \quad (7)$$

$$f(v) = \frac{1}{\tau} \int_D \rho \tilde{C}(T^n) T^n v \, dx + \int_\Gamma \alpha T_{amb} v \, d\gamma, \quad (8)$$

где τ — шаг по времени, n — номер временного слоя, v — пробная функция.

Используя вариационную постановку задачи и аппроксимацию по времени, определение температурного поля можно свести к решению системы линейных алгебраических уравнений.

Расчеты проводились для алмазов размерностью 1,0–5,0 мм при следующих данных: $c_{al} = 1129,19$; $c_1 = 2260,87$; $c_2 = 2302,74$; $c_r = 1420$ Дж/(кг·К); $\rho_{al} = 3515$; $\rho_1 = 1000$; $\rho_2 = 951$; $\rho_r = 930$ кг/м³; $\lambda_{al} = 1000$; $\lambda_1 = 0,12793$; $\lambda_2 = 11,74$; $\lambda_r = 0,159$ Вт/(м·К) [10–12]. Индексы: al , r — для алмаза и резины соответственно. В установке термоадгезионного извлечения зерен алмаза из концентрата кимберлитовой руды в качестве термоадгезионного вещества используется канифоль, для которой теплота фазового перехода $Q = 66,151$ кДж/кг. В расчетах считалось, что для прилипания алмаза необходимо оплавление канифоли на глубину 50 мкм. Шаги по времени изменялись в отрезке 0,00005–0,0002 с.

Определение диаметра зоны теплового контакта

Для определения размера зоны теплового контакта зерен алмаза, гарантированно обеспечивающего их прилипание, в расчетах использовались наименьшее значение теплопроводности и наибольшее значение теплоемкости алмаза. Рассматривалась возможность создания в установке трех потоков термоадгезионного отбора и извлечения алмазного сырья из смеси алмазов и сопутствующих минералов со следующими размерностями: 1,0–2,5; 2,5–4; 4,0–5,0.

В качестве примера расчета рассмотрим определение размера зоны теплового контакта, обеспечивающей прилипание в термоадгезионном веществе зерен

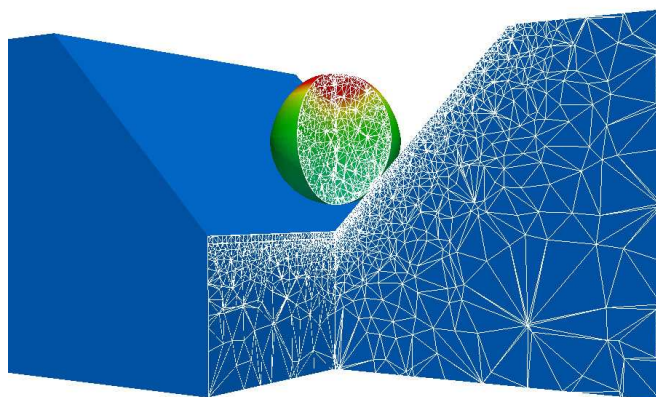


Рис. 2. Расчетная сетка, диаметр зерна алмаза 2,5 мм.

алмаза с размерностью 1–2,5 мм. Расчеты проводились для зерна алмаза размером 2,5 мм, поскольку найденный при этом минимальный размер зоны контакта алмаза с роликом-нагревателем будет обеспечивать прилипание и алмазов меньшего размера. Количество узлов сетки в расчетной области для алмаза с диаметром 2,5 мм составляло 34405, количество ячеек 161013 (рис. 2).

Продолжительности контакта алмазов различной размерности с роликом-нагревателем диаметром 22 мм при скорости движения транспортной ленты $V = 4$ см/с, рассчитанные по формуле (1), таковы:

Диаметр, мм	1	1,5	2	2,5	3	4	5
Время, с	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,08	0,1

Минимальный диаметр зоны контакта алмаза с роликом-нагревателем d_{cont} определялся следующим образом. Задавалось начальное приближение d_{cont} и рассчитывалось время достижения необходимой глубины оплавления канифоли. В случае, если оно меньше (больше) $t_k=0,04$, размер зоны теплового контакта уменьшался (увеличивался) с некоторым шагом и снова проводился расчет. Процесс уточнения решения прекращается при выполнении с заданной точностью условия равенства времени достижения необходимой глубины оплавления продолжительности теплового контакта t_k .

Для рассматриваемой размерности алмаза 1–2,5 мм расчетами получен минимальный диаметр зоны теплового контакта, обеспечивающий прилипание алмаза к канифоли, равный 0,8 мм. Для представления динамики температурного поля визуализируем тепловой процесс при полученном диаметре основания зоны контакта зерна алмаза с роликом-нагревателем. На рис. 3 представлены распределения температур в сечении плоскостью, ортогональной направлению транспортной ленты, в различные моменты времени. Показаны изотермы со значениями температур 60 (нижняя кривая) и 80 °С (верхняя кривая). Со-

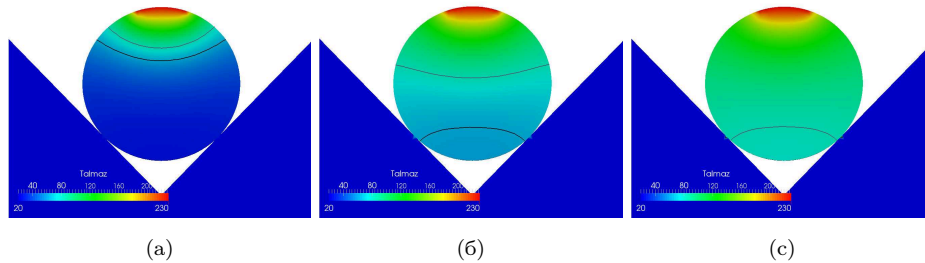


Рис. 3. Распределение температуры в сечении вертикальной плоскостью, ортогональной направлению транспортной ленты, в различные моменты времени: (а) — 0,002; (б) — 0,006; (в) — 0,0085.

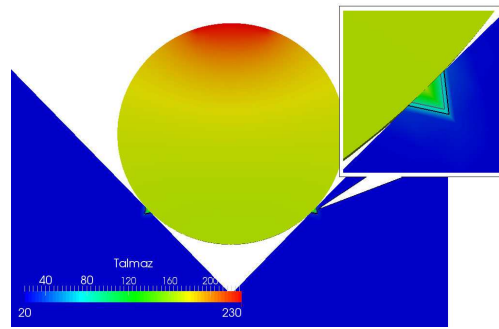


Рис. 4. Распределение температуры в сечении вертикальной плоскостью, ортогональной направлению транспортной ленты, в момент времени 0,04 с.

гласно расчетам при тепловом воздействии роликом-нагревателем изотермические поверхности в зерне алмаза, имеющие вогнутую форму в начале процесса (рис. 3(а)), постепенно становятся выпуклыми (рис. 3(б)). Через 0,006 секунд контакта алмаза с источником теплоты изотерма со значением температуры $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигает поверхности термоадгезионного вещества. Изотерма со значением температуры $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигает этой же точки за 0,0085 с (рис. 3(в)).

На рис. 4 представлено распределение температуры в сечении вертикальной плоскостью, ортогональной направлению транспортной ленты, в момент времени достижения изотермой с температурой $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ необходимой глубины оплавления. Изотерма со значением температуры $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ на термоадгезионном веществе, достигшая глубины 50 мкм за время $t_k=0,04$, показана на рис. 4 путем детализации (кривая черного цвета). Резкое изменение цвета в термограмме в окрестности точки контакта алмаза с термоадгезионным веществом показывает существенное снижение скорости распространения тепла, обусловленное низким значением теплопроводности термоадгезионного вещества. Изотерм со

значениями температур 60 и 80 °С в зерне алмаза в этом момент времени не осталось.

По приведенной методике расчетами получены следующие минимальные диаметры зоны контакта алмаза с роликом-нагревателем d_{cont} : 1,0 мм — для размерности алмаза 2,5–4 мм и 1,5 мм — для размерности 4–5 мм. Отметим, что при моделировании теплового процесса не учитывается внедрение зерна алмаза в оплавленную канифоль, что способствует определению минимального размера зоны теплового контакта с избытком (запасом). Таким образом, в установке, имеющей три потока термоадгезионного отбора и извлечения алмазного сырья из смеси алмазов и сопутствующих минералов с размерностями 1,0–2,5; 2,5–4; 4,0–5,0, ширины контактного края роликов-нагревателей должны составлять 0,8; 1,0; 1,5 мм соответственно.

Заключение

Предложена трехмерная математическая модель нестационарного теплового процесса системы «нагревательный элемент — алмаз — термоадгезионное вещество» установки термоадгезионного отбора и извлечения зерен алмаза из концентрата, учитывающая скрытую теплоту фазового перехода термоадгезионного вещества.

Разработана методика расчета диаметра зоны контакта алмаза с роликом-нагревателем, основанная на численном анализе динамики температурного поля в алмазе и термоадгезионном веществе. По разработанной методике рассчитаны ширины контактного края роликов-нагревателей, необходимые для реализации в установке эффективного извлечения алмаза из смеси сопутствующих минералов по трем потокам на транспортной ленте.

Методика может быть использована для сокращения объема экспериментальных исследований при дальнейшем совершенствовании установки и повышения его производительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарин П. П., Лебедев М. П., Никитин Г. М., Винокуров Г. Г. Разработка термоадгезионного метода отбора и извлечения зерен алмаза из концентрата кимберлитовой руды // Гор. журн. 2016. № 9. С. 59–64.
2. Афанасьева Н. М., Васильева М. В., Колесов А. Е. Математическое моделирование фильтрации. Якутск: Издат-полиграф. комплекс СВФУ, 2011.
3. Васильева М. В., Стальнов Д. А. Математическое моделирование термомеханического состояния тепловыделяющего элемента // Вестн. СВФУ. 2016. № 1. С. 45–59.
4. Афанасьева Н. М., Васильева М. В., Захаров П. Е. Параллельное численное моделирование процесса заводнения нефтяного месторождения // Мат. заметки ЯГУ. 2011. Т. 18, № 1. С. 159–172.
5. Software package FEniCS [Electronic resource]: <http://fenicsproject.org/>.
6. Software package GMSH [Electronic resource]: <http://geuz.org/gmsh/>.
7. Software package ParaView [Electronic resource]: <http://paraview.org/>.
8. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 2001.

9. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977.
10. Новиков Н. В. Физические свойства алмаза / Справочник. Киев: Наук. думка, 1987.
11. Жильников В. И., Хлопотунов Г. Ф. Модифицированная канифоль. М.: Лес. пром-сть, 1968.
12. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1967.

Поступила в редакцию 27 февраля 2020 г.

После доработки 25 мая 2020 г.

Принята к публикации 30 августа 2020 г.

Старостин Николай Павлович
Институт проблем нефти и газа СО РАН,
ул. Автодорожная, 20, Якутск 677007
nikstar56@mail.ru

Шарин Петр Петрович
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
ул. Октябрьская, 1, Якутск 677980
psharin1960@mail.ru

Аммосова Ольга Александровна
Институт проблем нефти и газа СО РАН,
ул. Автодорожная, 20, Якутск 677007
ammosova_o@mail.ru

UDC 622.23.05+004.942+519.876.5

SIMULATION OF THERMAL PROCESS
DURING THERMAL ADHESION SELECTION
AND EXTRACTION OF HIGHLY HEAT CONDUCTIVE
MATERIAL GRAINS FROM CONCENTRATE

N. P. Starostin, P. P. Sharin,
and O. A. Ammosova

Abstract: A numerical simulation of the temperature field dynamics with short contact of the roller heater with diamond grains moving in trench on the conveyor belt with a layer of a thermal adhesive is used to increase the performance of the heat adhesion screening and extraction of rough diamonds from the concentrate. For determining the width of the contact edge of the roller heater in the apparatus which ensures the fixing of diamonds of given dimension in the heat adhesive substance, we propose a calculation method based on the analysis of the temperature field dynamics in the "heating element–diamond–heat adhesive substance" system. It is believed that the diamond attachment is ensured by melting the heat adhesive substance to a certain depth during the thermal contact of the diamond with the heating roller. According to the proposed method, we calculate the widths of the contact edge of the heating rollers, which are necessary for the installation of effective extraction of diamonds from a mixture of related minerals in three streams on the conveyor belt. The technique can be used to reduce the amount of experimental research with further improvement of the installation and increase its productivity.

DOI: 10.25587/SVFU.2020.69.70.008

Keywords: diamonds, heat adhesion method, rosin, diamond extraction, finite element method, phase transition, contact area.

REFERENCES

1. Sharin P. P., Lebedev M. P., Nikitin G. M., and Vinokurov G. G., "Development of heat adhesive method for selection and extraction of diamond grains from kimberlite ore concentrate [in Russian]," *Gorn. Zhurn.*, No. 9, 59–64 (2016)
2. Afanas'eva N. M., Vasilyeva M. V., and Kolesov A. E., *Mathematical Modeling of Filtration* [in Russian], Izdatel.-Poligraf. Kompl. SVFU, Yakutsk (2011)
3. Vasilyeva M. V. and Stalnov D. A., "Mathematical modeling of thermomechanical state of the fuel element [in Russian]," *Vestn. SVFU*, No. 1, 45–59 (2016).
4. Afanas'eva N. M., Vasilyeva M. V., and Zakharov P. E., "Parallel numerical simulation of oil field waterflooding [in Russian], *Mat. Zametki YaGU*, **18**, No. 1, 159–172 (2011).
5. Software package FEniCS [Electronic resource]: <http://fenicsproject.org/>
6. Software package GMSH [Electronic resource]: <http://geuz.org/gmsh/>
7. Software package ParaView [Electronic resource]: <http://paraview.org/>
8. Samarskii A. A., *The Theory of Difference Schemes*, Marcel Dekker Inc., New York; Basel (2001).
9. Strang G. and Fix G. J., *An Analysis of the Finite Elements Method*, Prentice-Hall (1977).

10. Novikov N. V., The Physical Properties of Diamonds [in Russian], Nauk. Dumka, Kiev (1987).
11. Zhilnikov V. I. and Hlopotunov G. F., Modified Rosin [in Russian], Lesn. Promyshlen., Moscow (1968).
12. Chirkin V. S., Thermophysical Properties of Nuclear Technology Materials [in Russian], Atomizdat, Moscow (1967).

Submitted February 27, 2020

Revised May 25, 2020

Accepted August 30, 2020

Nikolay P. Starostin
Institute of Oil and Gas Problems,
20 Avtodorozhnaya Street, Yakutsk 677007, Russia
nikstar56@mail.ru

Petr P. Sharin
Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North,
1 Oktyabrskaya Street, Yakutsk 677980, Russia
psharin1960@mail.ru

Olga A. Ammosova
Institute of Oil and Gas Problems,
20 Avtodorozhnaya Street, Yakutsk 677007, Russia
ammosova_o@mail.ru