

УДК (UDC) 69.002.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОСЪЕМНИКА БУРОВОГО СТАВА ДЛЯ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

MODELING OF THE HEAT BALANCE OF ELEMENTS OF A DRILL HYDRAULIC REMOVER FOR INJECT CEMENTATION OF SOILS DURING OPERATION

Новиков В.И.¹, Пушкарев А.Е.¹, Манвелова Н.Е.²
Novikov V.I.¹, Pushkarev A.E.¹, Manvelova N.E.²¹ – Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Россия)¹ – Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint-Petersburg, Russian Federation)² – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (Санкт-Петербург, Россия)² – The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы построения математической модели, определяющей тепловой баланс в узле «гидросъемник-буровой вал», используемом в устройствах для струйной цементации грунтов. Проанализированы две основные группы материалов, применяемые в подобных конструктивных узлах для изготовления уплотняющих элементов (эластомеры и термопласты). Описаны предъявляемые требования и указаны условия эксплуатации данных материалов. Отдельно акцентировано внимание на диапазоне рабочих температур материалов уплотнительных элементов для гидросъемников. Приведен алгоритм, использованный для проведения вычислительного эксперимента с указанием применяемого при расчете программного пакета для решения прикладных задач прочности и теплообмена. Представлена твердотельная модель участка бурового вала с разбиением на конечные элементы. Показано полученное в результате расчета методом конечных элементов распределение теплового поля в элементах гидросъемника бурового става и выявлены факторы, существенно влияющие на распределение температуры. Обосновывается предположение, что материалы, применяемые в настоящее время в гидросъемниках для струйной цементации грунтов, не выдерживают тепловую нагрузку, возникающую в подобных устройствах сверхвысокого давления в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: струйная цементация, буровой став, тепловой баланс, температурное поле.

Дата принятия к публикации: 19.06.2020
Дата публикации: 25.09.2020

Сведения об авторах:

Новиков Виталий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические машины», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, e-mail: vitalynewage@gmail.com.

Пушкарев Александр Евгеньевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «На-

Abstract. The article deals the issues of constructing by according to previously developed methods of the model that describes the heat balance in the unit “hydraulic puller-drill shaft”, which is used in jet-grouting devices. Two main groups of materials used in similar structural units for the manufacture of sealing elements, which include elastomers and thermoplastics, are analyzed. The requirements are described and the operating conditions of these materials are indicated. Separately, attention is focused on the range of operating temperatures of materials of sealing elements for hydraulic pullers. The algorithm used for the computational experiment with the indication used in the calculation, the software package that allows to solve applied problems of strength, heat transfer, etc. A solid model of a section of a drill shaft with a meshing of finite elements is presented. It is shown that the distribution of the thermal field in the elements of the hydraulic cutter of the drill head, obtained as a result of the finite element calculation, that arises during operation and factors that significantly affect the temperature distribution are identified. The assumption is substantiated that the materials currently used in hydraulic pullers for jet cementation of soils do not withstand the heat load that occurs in such ultra-high pressure devices during their operation.

Keywords: jet-grouting, drilling bar, heat balance, temperature field.

Date of acceptance for publication: 19.06.2020
Date of publication: 25.09.2020

Authors' information:

Vitaly I. Novikov – Candidate of Technical Sciences, Docent of Department “Land Transport and Technological Vehicles” at Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, e-mail: vitalynewage@gmail.com.

Pushkarev Alexander Evgenievich – Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of Department

земные транспортно-технологические машины», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
e-mail: pushkarev-agn@mail.ru

Манвелова Наталья Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Экология и безопасность жизнедеятельности», Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
e-mail: manvelova@inbox.ru

† “Land Transport and Technological Vehicles” at Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, *e-mail: pushkarev-agn@mail.ru.*

† **Natalya E. Manvelova** – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor, Assistant professor of Department “Environmental Security of Telecommunications” at The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
† *e-mail: manvelova@inbox.ru.*

1. Введение

В настоящее время одним из широко применяемых направлений в технологии и технике разрушения грунтов и создания из них грунтобетона является метод струйной цементации грунтов, для которого применяются устройства сверхвысокого давления. Схема, нашедшее наибольшее применение, подразумевает наличие источника высокого давления и средства передачи высоконапорной струи цементного раствора к технологическому инструменту. Передающие магистрали могут быть довольно протяженными, что снижает их надежность и приводит к значительным гидравлическим потерям по длине. Это осложняет подбор оборудования и увеличивает эксплуатационные затраты [1, 2].

2. Постановка задачи

Существующие математические модели описания теплового баланса гидросъемника, назначение которого состоит в передаче гидравлического давления от неподвижных элементов к вращающемуся инструменту [3, 4], основываются на том, что выделяющаяся в процессе трения между уплотнительным элементом и буровым валом теплота нагревает уплотнительный элемент и далее передается другим элементам конструкции. Таким образом, при подобном подходе не рассматривается непосредственно причина тепловыделения (трение по контактирующим поверхностям) [4, 5].

Основываясь на разработанных методиках [6], следует обратить внимание на материалы, применяемые при производстве уплотнений для гидросъемника. Правильный выбор материала для уплотнительных элементов играет огромную роль при эксплуа-

тации всего узла, так как от этого зависит тепловой баланс рассматриваемой системы и время непрерывной работы всего устройства сверхвысокого давления. Предъявляются следующие требования к основным характеристикам существующих материалов для производства уплотнительных элементов:

- требования к уровню остаточной деформации;
- требования к абразивному износу;
- требования к механическим свойствам;
- требования к способности сохранять вышеуказанные характеристики при физическом и химическом воздействии рабочей жидкости.

Как правило, для достижения этих характеристик необходимо применять комбинацию материалов.

3. Анализ применяемых материалов для производства уплотнительных элементов гидросъемника

Наиболее распространенными материалами для производства уплотнительных элементов являются эластомеры, характерными представителями которых являются каучук и фторкаучук, а также термопласты – полиуретан, полиэфирная смола и др.

Эластомеры представляют собой материалы, которые могут растягиваться достаточно сильно под воздействием относительно небольшой силы. Строение эластомеров таково, что они обладают очень высокой степенью способности возвращения в исходное положение [7]. Известны следующие виды эластомеров:

1. Акрило-нитрилбутадиеновый каучук, получаемый в процессе полимеризации бутадиена с добавлением макрилонитрила в разном количественном соотношении. Этот вид

каучука распространен для производства уплотнений, так как благодаря своим химическим свойствам он совместим с минеральными жидкостями. При необходимости его можно эксплуатировать при более сложных условиях, для чего требуется провести полимеризацию. Основные свойства акрило-нитрилбутадиенового каучука: низкая остаточная деформация сжатия; хорошая механическая прочность; рабочие температуры – от -30°C до $+110^{\circ}\text{C}$.

2. Фторкаучук, получаемый полимеризацией из фторида винилдиена и гексафторпропилена. К преимуществам фторкаучука относят хорошую стойкость к высоким температурам и к воздействию химически агрессивных сред. Он применяется, когда требуется сбалансированное сочетание физических и механических свойств. Основные свойства фторкаучука: низкая остаточная деформация сжатия; хорошее механическое сопротивление; хорошая газопроницаемость; отличная химическая стойкость к минеральным маслам, в том числе бензину и парафину, невоспламеняющимися жидкостям с содержанием фосфорных элементов и т.д.; рабочие температуры – от -20°C до $+200^{\circ}\text{C}$.

3. Этилен-пропилен каучук, получаемый в результате полимеризации этилена с пропиленом с добавлением небольшой части третьего мономера. В основном этилен-пропилен каучук применяется в устройствах, работающих в контакте с горячей водой, в том числе, в контакте с паром, а также фосфатными эфирными маслами и этиленгликолевыми жидкостями. Однако растворимость минеральными маслами существенно снижает возможности по применению данного эластомера. Основные свойства этилен-пропилена: низкая остаточная деформация сжатия; способность сохранять эластичность при низких температурах; высокая стойкость к сложным погодным условиям и воздействию озона; высокая стойкость к растительным маслам; рабочие температуры – от -50°C до $+150^{\circ}\text{C}$.

4. Термопласты – материалы, которые при нагревании обратимо переходят в пластичное или вязкотекучее состояние и затем происходит формообразование непосредственно в изделия. Наиболее распространены

термопласты на основе полиуретана, полиацетали, полиэфирной смолы, политетрафторэтилена [7].

5. Полиуретан - термопластичный материал, изготавливаемый из высококачественных полиэфиров. Имеет хорошую прочность и высокую устойчивость к абразивному износу. Основные свойства полиуретана: нерастворим минеральными маслами; высокая устойчивость на разрыв; высокая стойкость к погодному старению и воздействию озона; рабочие температуры – от -40°C до $+100^{\circ}\text{C}$.

6. Полиэфирная смола, являющаяся сравнительно новым материалом в классе термопластов. Она нашла применение при изготовлении колец противовыдавливания, используемых для поддержки элементов уплотнения. Основные свойства полиэфирных смол: стабильность размеров; высокая механическая прочность; хорошее сопротивление выдавливанию; нерастворима минеральными маслами и растворителями, такими как эфиры, кетоны, амиды и т.д.; рабочие температуры – от -40°C до $+140^{\circ}\text{C}$.

7. Полиацеталь (полиформальдегид, полиметиленоксид или полиоксиметилен) - термопластичный материал, обладающий высокой прочностью наряду с высокими показателями жесткости и твердости. Подобное сочетание свойств делает его незаменимым в гидравлике при использовании в качестве опорно-направляющих колец. Основные свойства полиацетала: стабильность размеров; высокие прочность и жесткость; упругость и эластичность; высокая ударная вязкость; хорошие смазочные свойства; химически стоек в агрессивных средах, таких как вода, бензин, растворители и др.; рабочие температуры – от -40°C до $+110^{\circ}\text{C}$.

8. Политетрафторэтилен. Данный термопласт не в такой степени эластичен, как резина, но характеризуется следующими свойствами: низкий коэффициент трения и эффект самосмазывания; является диэлектриком; приобретает высокие механическая прочность при использовании наполнителей (стекло, бронза, углерод); инертен практически ко всем промышленным жидкостям и химикатам; рабочие температуры – от -200°C до $+200^{\circ}\text{C}$.

На сегодняшний день технология уплотнения гидросистем, осуществляющих различное по характеру движение (вращательное, возвратно-поступательное и т.д.) изучено достаточно подробно. Уплотнительные элементы для гидросистем производятся из одного или нескольких указанных материалов, подбираемых в зависимости от условий эксплуатации для конкретной ситуации. При работе в гидроприводах манжетные уплотнительные элементы функционируют в неблагоприятных условиях. Условия работы уплотнительных элементов в гидроцилиндрах: давление или перепад давлений $p < 50$ МПа, а для некоторых конструкций может достигать 100 МПа; скорость скольжения $V < 0.5$ м/с; рабочие температуры $t = -60^{\circ}\text{C} - +200^{\circ}\text{C}$.

Характер повреждения уплотнительных элементов зависит от конструкции и типа уплотнения и пары материалов поверхностей. Для кольцевых уплотнительных элементов характерными повреждениями являются износ поверхностей и заедание уплотнительных элементов, препятствующие осевому движению динамического уплотнительного кольца и кольца уплотнительного элемента. Для уплотнений с поверхностями из материалов с высокой твердостью характерны повреждения, вызванные работой в режиме отсутствия смазки. При трении уплотнительного элемента и вала выделяется теплота. В случае недостаточной смазки величина теплового потока может достигать 100 Вт/см². Чтобы свести к минимуму повышение температуры в зазоре, необходимо отводить образующееся тепло. Количество отведенного тепла определяется величиной потока жидкости в камере, теплопроводностью деталей уплотнительного элемента, теплоотдачей в атмосферу.

Существуют варианты, при которых влияние этих факторов незначительно, что приводит к испарению смазочной пленки в зазоре уплотняющего элемента и его работе без смазки.

Для процесса моделирования требуется подробная информация о применяемом уплотнительном элементе и условиях его работы, включая величину воздействующих в процессе эксплуатации температур или теп-

ловых потоков. Вычислительный эксперимент позволяет оптимизировать ранние стадии проектных разработок, сравнить различные варианты проектных решений, снизить стоимость продукции, сократить цикл разработки, а также свести к минимуму дорогостоящий процесс доработки изделия. Для современных наукоемких отраслей он является не только весьма затратным, но и не всегда возможным в полном объеме. Использование математического моделирования позволяет улучшать существующие конструкции, в том числе и за счет учета существенных особенностей свойств конструктивных материалов. [8]

4. Моделирование теплового баланса гидросъемника бурового вала

Для проведения вычислительного эксперимента был использован пакет «Компас-3D FEM», позволяющий решать прикладные задачи прочности и теплообмена методом конечных элементов.

Была построена 3D-модель бурового вала (рис. 1), по поверхности которого происходит тепловыделение (на рис. 1 выделено цветом). 3D-модель представляет собой цилиндрическую часть бурового вала гидросъемника длиной 188 мм, с двух сторон ограниченную фланцевыми элементами с внутренним глухим отверстием диаметром 45 мм для подачи водно-цементной смеси. На рис. 1 показано сечение рассматриваемого вала по центральной оси. В силу того, что возникающая тепловая мощность одинаково воздействует на контактные поверхности бурового вала и уплотнительного элемента, достаточно рассмотреть распределение теплового поля в буровом вале, без создания 3D-модели уплотнительной манжеты. Аналогичным образом для проведения теплового расчета не рационально создавать 3D-модели других составляющих элементов гидросъемника - корпуса, штуцера подвода суспензии, крепежных элементов, поскольку они не взаимодействуют с моделируемыми контактными поверхностями и их присутствие не влияет на количество выделяемой теплоты.

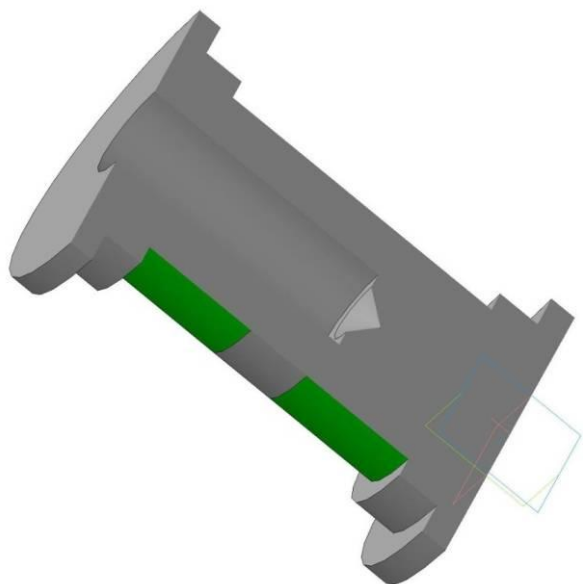


Рис. 1. 3D-модель части бурового вала с фланцевыми элементами предварительного закрепления и поверхностями трения

В качестве материала бурового вала задана Сталь 10, характеризующаяся следующими механическими и физическими свойствами: пределы текучести, прочности при сжатии, выносливости при растяжении, выносливости при кручении составляют 235 МПа, 410 МПа, 209 МПа, 139 МПа; нормальный модуль упругости – 200000 МПа; коэффициенты Пуассона и линейного расширения – 0.3 и 0,000012 1/°С; коэффициент теплопроводности 55 Вт/(м°С).

Построение конечно-элементной модели произведено элементами с максимальной длиной стороны 5 мм. Сетка конечных элементов сгенерирована с максимальными коэффициентами сгущения на поверхности и разрежения в объеме – 1 и 1.5 соответственно. Она содержит 38331 конечных элементов и 10318 узлов (рис. 2).

Чтобы задать тепловую нагрузку, необходимо рассчитать значение температуры, воздействующей на контактные поверхности. При известном значении величины тепловой мощности (при давлении 36 МПа в течении трех минут она достигает 7.6 кВт [5]) количество выделившейся за то же время теплоты составляет 1368 кДж. С другой стороны, количество теплоты можно определить по формуле [9, 10]:

$$Q = cm\Delta T, \quad (1)$$

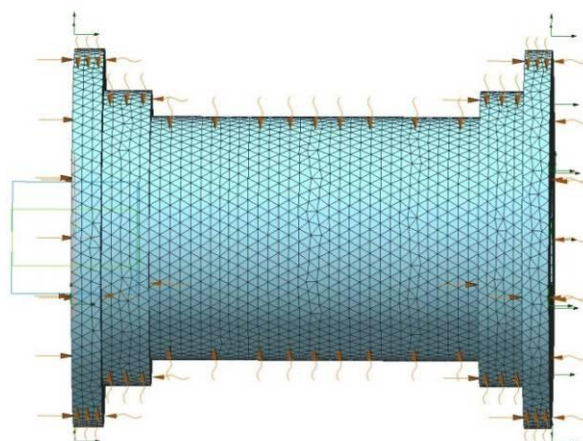


Рис. 2. Конечно-элементная сетка бурового вала

где c – удельная теплоемкость вещества (для стали составляет 500 Дж/кг°С); m – масса вещества (составляет 12 кг); ΔT – изменение температуры от начального значения $T_1 = 20^\circ\text{C}$ до конечного искомого T_2 , °С.

Задаваемым значением является величина температуры T_2 . После преобразования формулы (1) температура T_2 может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$T_2 = \frac{Q}{cm} + T_1, \quad (2)$$

Подставляя численные данные в формулу (2), получаем значение температуры $T_2 = 240^\circ\text{C}$. До такой температуры нагреваются контактирующие поверхности трения бурового вала и уплотнительного элемента в гидросъемнике, температура остальных поверхностей принята 20°C . Данное допущение возможно, поскольку внутренние поверхности отверстия диаметра 45 мм охлаждаются за счет перемещения по нему водноцементной смеси. Ее температура варьируется в довольно значительных пределах в связи с тем, что при увеличении значения давления температура смеси также увеличивается и может достигать 60°C . Температура поверхностей, контактирующих с внешней средой (окружающим атмосферным воздухом), также может быть различной в зависимости от условий, в которых эксплуатируется буровой став. Нижним пределом температуры воздуха можно принять 5°C . Таким образом, для

упомянутых поверхностей задано усредненное значение – 20°C.

5. Результаты и их анализ

Результаты расчета распределения температуры в пределах выбранного участка бурового вала приведены на рис. 3.

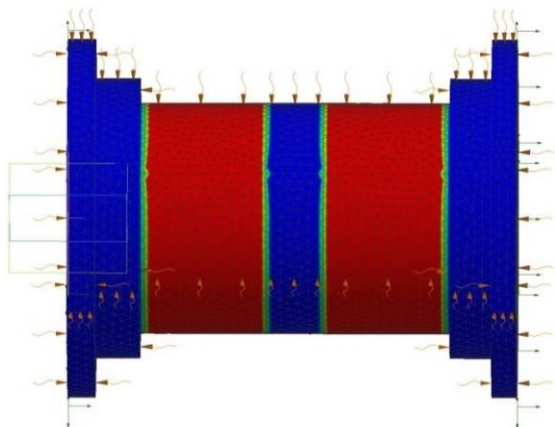


Рис. 3. Модель распределения теплового поля по внешней поверхности бурового вала

Более показательным является распределение теплового поля внутри бурового вала, представленное на рис. 4. Расчет показывает, что температура свыше 200°C наблюдается на глубине не более 10 мм от контактной поверхности с последующим уменьшением до значения 20°C.

Следует отметить, что фланцевые элементы предварительного закрепления не нагреваются выше 31°C. Нагрев до данной температуры происходит исключительно локально (в зоне отсутствия отверстия) в областях, примыкающим к поверхностям вала. Заметно влияние потока водно-цементной смеси в области, находящейся между контактными поверхностями (в этой области располагаются отверстия для подачи водно-цементной смеси) с температурой до 60°C.

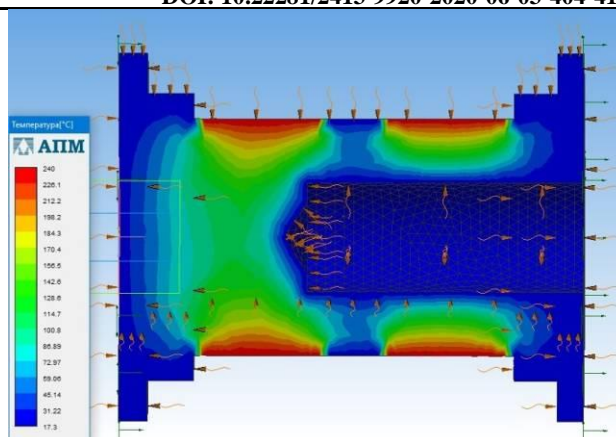


Рис. 4. Распределение температурного поля в объеме бурового вала

6. Заключение

Анализ полученного распределения температуры показал, что полимерные материалы, применяемые в настоящее время для изготовления уплотнительных элементов, не могут выдержать подобную тепловую нагрузку, так как диапазон их рабочих температур лежит ниже 200°C. Например, для капролона марки ПА-6 в зависимости от разновидности температура начала размягчения составляет 145...165°C, а температура плавления – 218...262°C. Соответственно, необходимо влиять на тепловой баланс в системе «гидросъемник-буровой вал» путем:

- изменения технологических параметров, что, несомненно, скажется на производительности;
- уменьшения тепловыделения путем обработки поверхности бурового вала, способной изменять морфологию поверхности для уменьшения площади поверхности трения (например, такой как электролитно-плазменная [11]);
- применения материалов, способных выполнять функции уплотнения и одновременно выдерживать значительные тепловые нагрузки.

Список литературы

1. Бройд И.И. Струйная геотехнология. М.: Изд-во АСВ, 2004. 448 с.
2. Головин К.А. Обоснование параметров и создание оборудования для гидроструйной цементации неустойчивых пород в горном производстве: дис. ... доктора техн. наук. Тула, 2007. 336 с.
3. Гарипов М.В., Головин К.А. Разработка конструкции расширителя прокалывающей установки для закрепления неустойчивых горных пород // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 1. С. 326-329.
4. Леонтьев Н.С. Выбор и обоснование конструктивных параметров и режимов работы гидросъемника гидроструйной бурильной машины: дис. кандидата техн. наук. Тула, 2012. 142 с.
5. Головин К.А., Маликов А.А., Пушкарев А.Е. Тепловой режим работы гидросъемника высокого давления на установках гидроструйной цементации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 4. С. 46-52.
6. Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Воронцов И.И. Методика моделирования теплового баланса элементов конструкции строительно-дорожных машин для струйной цементации грунтов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 3. С. 369-376.
7. Манжетное уплотнение [Электронный ресурс]. Точка доступа: <http://www.dic.academic.ru> (дата обращения 29.03.2020).
8. Красновский Е.Е. Решение прикладных задач термомеханики с применением программного комплекса ANSYS. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 88 с.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
10. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, Наука, 2004. 798 с.
11. Popov A.I., Novikov V.I., Radkevich M.M. Characteristics of the development of electric discharge between the jet electrolyte cathode and the metal anode at atmospheric pressure // High Temperature. 2019. Vol. 57. No. 4. С. 447-457.

References

1. Broid I.I. Jet grouting method. Moscow, ABC, 2004. 448 p. (In Russian).
2. Golovin K.A. Justification of the parameters and the creation of equipment for hydrojet cementation of unstable rocks in the mining. Diss. Doc. Sci. (Engineering) Tula. 2007. 336 p. (In Russian).
3. Golovin K.A. Development of the design of the extender piercing installation for fixing unstable rocks. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskii nauki*, 2013, No. 1, pp. 326-329. (In Russian).
4. Leontev N.S. Selection and justification of the design parameters and modes of operation of the hydrostatic drilling machine. Diss. Cand. Sci. (Engineering) Tula. 2012. 142 p. (In Russian).
5. Golovin K.A., Malikov A.A., Pushkarev A.E. Thermal mode of operation of high-pressure hydraulic puller at hydro jet grouting installations. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskii nauki*, 2015, No. 4, pp. 46-52. (In Russian).
6. Novikov V.I., Pushkarev A.E., Vorontsov I.I. The modeling of the heat balance elements of construction jet-grouting machines. *Nauchno-tekhnicheskii Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No. 3.
7. Lip seal. Available at: <http://www.dic.academic.ru> (In Russian).
8. Krasnovskiy E.E. Solving applied problems of thermomechanics using the ANSYS software. Moscow, 2008. 88 p. (In Russian).
9. Likov A.V. Heat conduction theory. Moscow, Visshaya shkola, 1967. 599 p. (In Russian).
10. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. Equations of mathematical physics. Moscow, MGU, 2004. 798 p. (In Russian).
11. Popov A.I., Novikov V.I., Radkevich M.M. Characteristics of the development of electric discharge between the jet electrolyte cathode and the metal anode at atmospheric pressure. *High Temperature*, 2019, Vol. 57, No. 4, pp. 447-457. (In Russian).