

ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ГИДРОСЪЕМНИКА ГЕОМЕТРИИ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОСТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Новиков В.И., Кузьмин О.В.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: гидроструйные технологии, буровой став, передающее устройство, уплотнительный элемент, 3D-модель гидросъемника, тепловое поле, тепловой баланс, метод конечных элементов.

Аннотация. В статье рассматривается характер и уровень влияния, как геометрических параметров элементов конструктивного узла «гидросъемник», так и параметров, описывающих характеристики непосредственно самой гидроструйной технологии. В качестве геометрических приняты характеристики элементов устройства, от которых в максимальной степени зависит величина тепловыделения по контактным поверхностям и величина передаваемой тепловой энергии, т.е. это внутренний и наружный диаметры вала и длины одностороннего пакета уплотнительных элементов и внутреннего отверстия. Для более универсального описания рассмотрено влияние и получены зависимости для безразмерных геометрических показателей – приведенного диаметра и приведенной длины. Технологическими параметрами, наиболее влияющими на объем выделяемого тепла в процессе эксплуатации, являются давление рабочей жидкости и частота (либо линейная скорость) вала гидросъемника. В работе применялось имитационное моделирование передающего устройства высокого давления для гидроструйных технологий. Процесс моделирования реализован методом конечных элементов в нескольких вычислительных средах, таких как «SolidWorks Simulation» и «Siemens Femap», причем во втором случае выполнен статический расчет с использованием начально-краевой задачи первого рода, а с применением первого пакета программного обеспечения выполнено имитационное моделирование с решением начально-краевой задачи третьего рода с движением рабочей жидкости по внутреннему отверстию передающего устройства. По результатам моделирования выявлена взаимосвязь значения температуры, как от технологических параметров, так и от геометрических. Получена математическая зависимость величины температуры от значения вышеуказанных величин.

THE INFLUENCE OF THE ELEMENT'S GEOMETRY AND THE HYDRO-JET TECHNOLOGIES TECHNOLOGICAL PARAMETERS TO THE THERMAL STATE OF THE HYDRO-PULLER DEVICE

Novikov V.I., Kuzmin O.V.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg

Keywords: hydro-jet technologies, drilling bar, hydro-puller device, sealing, hydro-puller device's 3D-model, thermal field, heat balance, finite element method.

Abstract. The article discusses the nature and level of influence of both the geometric parameters of the “hydro-puller device” structural elements, and the parameters that describe the characteristics of the hydro-jet technologies. The geometric characteristics of the device elements are taken, on which the amount of heat generation along the contact surfaces and the amount of transferred thermal energy depend to the maximum extent, such these are the internal and external diameters of the shaft and the length of the one-sided package of sealing elements and the internal hole. For a more universal description, the influence is considered and dependencies are obtained for dimensionless geometric indicators characterizing the contact area of the surfaces along which friction occurs – the reduced diameter, and the reduced length. The technological parameters that most influence the amount of heat generated during operation are the pressure of the working fluid and the frequency (or linear speed) of the hydraulic puller shaft. The work used simulation modeling of a high-pressure transmission device for hydro-jet technologies. The modeling process is implemented by the finite element method in several computing environments, such as “SolidWorks Simulation” and “Siemens Femap”, and in the second case, a static calculation was performed using an initial-boundary value problem of the first kind, and using the first software package, simulation modeling was performed with solving an initial-boundary value problem of the third kind with the movement of the working fluid along the internal opening of the transmitting device. Based on the modeling results, a relationship between the temperature value and both technological and geometric parameters was revealed. A mathematical dependence of the temperature value on the values of the above values is obtained.

Введение

Гидроструйные технологии представляют собой группу методов, использующих высокоскоростную струю рабочей жидкости для достижения различных целей. В основе любой из гидроструйных технологий лежит принцип использования кинетической энергии высокоскоростной струи воды, либо смеси воды с чем-либо, будь то абразивный материал или, например, цемент. Основные достоинства, определившие использование гидроструйных технологий это в первую очередь эффективность, поскольку данные технологии обеспечивают быстрое и качественное выполнение работ, так же немаловажной является такая характеристика как универсальность гидроструйных технологий. Гидроструйные технологии являются экологически чистой альтернативой многим традиционным методам обработки материалов, что делает их привлекательными в контексте борьбы с загрязнением окружающей среды. Дополнительными преимуществами являются безопасность с точки зрения риска возгорания или взрыва при работе с материалами, имеющими подобную особенность и конечно экономичность, т.к. позволяют снизить расходы на производство и обслуживание [1-3]. Таким образом, гидроструйные технологии занимают устойчивое положение в промышленности: очистка оборудования, резка металла, обработка поверхностей, удаление окалины, резка, гидроразрыв пласта, бурение скважин и т.д. [4-7].

Гидроструйные технологии обладают значительным потенциалом для развития и совершенствования. Разрабатываются новые материалы для изготовления насосов и форсунок, что позволяет увеличить рабочее давление и ресурс оборудования. Улучшаются имеющиеся и внедряются новые системы управления гидроструйными установками, что повышает точность и эффективность работы. Расширяется область применения за счет разработки новых методов использования гидроструйных технологий в различных отраслях [8].

Основными конструктивными элементами в любой гидроструйной технологии являются в первую очередь насос, который под высоким давлением нагнетает рабочую жидкость и форсунка или сопло, за счет которого происходит формирование из потока рабочей жидкости узкой направленной струи с требуемыми характеристиками (скорость, давление, диаметр). Такая первоочередность обеспечила на сегодняшний день данным механизмам высокую степень исследованности и промышленного внедрения. Однако сами по себе они не могут функционировать, поскольку нуждаются в соединительных элементах, т.е. трубопроводах высокого давления (являются гостированными изделиями) и, т.к. есть необходимость для большинства из различных гидроструйных технологий осуществлять передачу рабочей жидкости ко вращающемуся соплу от неподвижного насоса, то присутствует в выше обозначенной компоновочной цепочке передающее устройство, для которого на сегодня нет достаточного количества исследований, но которое является наименее надежным узлом [9, 10], поэтому исследования теплового состояния в передающем устройстве в зависимости от геометрических и технологических параметров будут являться актуальными и востребованными.

Материалы и методы исследований

Данные, полученные в предыдущих работах [11-15], позволили провести вычислительный эксперимент по определению зависимостей, описывающих влияние как геометрических параметров вала передающего устройства (диаметра и длины внутренней полости), так и технологических показателей гидроструйных технологий – давления рабочей жидкости и частоты вращения струеформирующего устройства (сопла).

Вычислительная часть моделирования осуществлялась в программных средах «*Siemens Femap*» и «*SolidWorks Simulation*». При наличии возможности, например, при решении осесимметричной задачи и начально-краевой задачи первого рода можно снизить объем вычислений путем создания 3D-модели не целиком всего объекта, а использовать лишь его часть (половину, четверть и т.д.), что и было реализовано для расчетов в пакете «*Siemens Femap*». В «*SolidWorks Simulation*» решалась начально-краевая задача третьего рода с заданием температуры рабочей жидкости и окружающей среды и, следовательно, было необходимо использовать полноразмерную 3D-модель. Основным устройством, по которому

производилось построение модели, была принята конструкция, применяемая в гидроструйной технологии для закрепления неустойчивых и слабых грунтов (jet grouting или струйная цементация грунтов) (рис. 1).

Составными элементами являются вал $\varnothing 100$ мм внутри которого находится глухое отверстие для подачи водно-цементной смеси во внутреннюю полость и два отверстия $\varnothing 20$ мм через которые проводится смесь, а также неподвижных составляющих: двух пакетов уплотнительных элементов, корпуса и крышек с зажимающими болтами. Материалы, применяемые в моделях, соответствуют по своим физико-механическим характеристикам коррозионностойкой стали 40X13; полиамиду ПА-6.

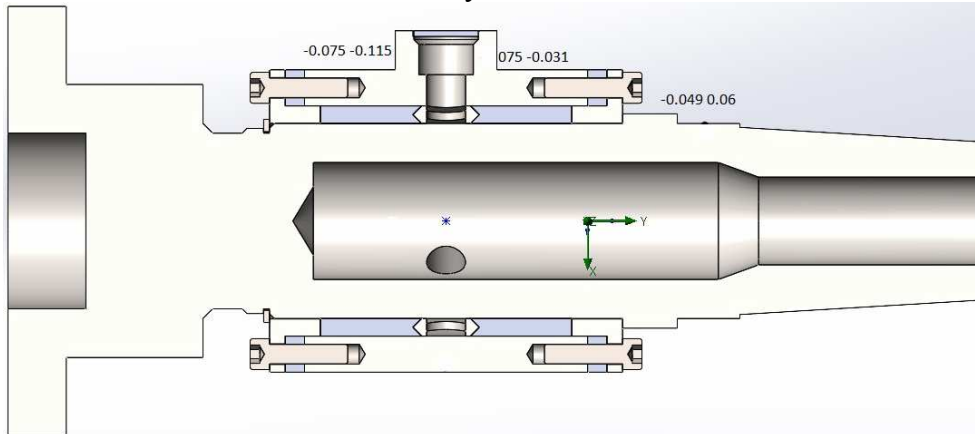


Рис. 1. 3D-модель в продольном сечении передающего устройства («SolidWorks Simulation»)

В местах контакта была задана термическая нагрузка путем выделения тепловой мощности, величиной, рассчитываемой по зависимости, выявленной в ранее проведенных исследованиях [15], при давлении P рабочей жидкости 40, 60, 80, 100 МПа, частоте вращения вала n – 10, 30, 60 об/мин для исследования влияния технологических показателей и давлении P – 5, 15, 50, 100 МПа, частоте вращения вала n – 15, 30, 45, 60 об/мин и $d_{\text{внут}}$ – 40, 52, 62, 75 мм и перекрытием глубиной внутренней полости вала от оси входного отверстия $\varnothing 20$ мм длины пакета уплотнительных элементов l – 5, 10, 15 20 мм для исследования влияния изменения геометрических параметров. Для более простого описания изменяя геометрии без привязки к отдельно взятому устройству введены безразмерные величины – приведенный диаметр $D_{\text{прив}}$ (отношение диаметра внутреннего отверстия вала к его наружному диаметру) и приведенная длина $L_{\text{прив}}$ (отношение глубины отверстия к длине одного пакета уплотнительных элементов).

В связи с тем, что рассмотреть каждую точку теплового поля не целесообразно, то будет рациональным решением выделить ряд наиболее характерных точек, соответствующих тепловым зонам (рис. 2), – околоконтактная зона вала и уплотнительных элементов (на рис. 2 сверху выделено толстой линией на фрагменте чертежа и на рис. 3 снизу точки 1, 2, 4, 5) и две периферийные зоны (рис. 2, снизу точки 3, 6), а также – место накопления выделяющегося тепла (рис. 2, снизу точка 7). Однако количество рассматриваемых точек можно сократить до пяти с учетом их дублирования в силу симметрии устройства.

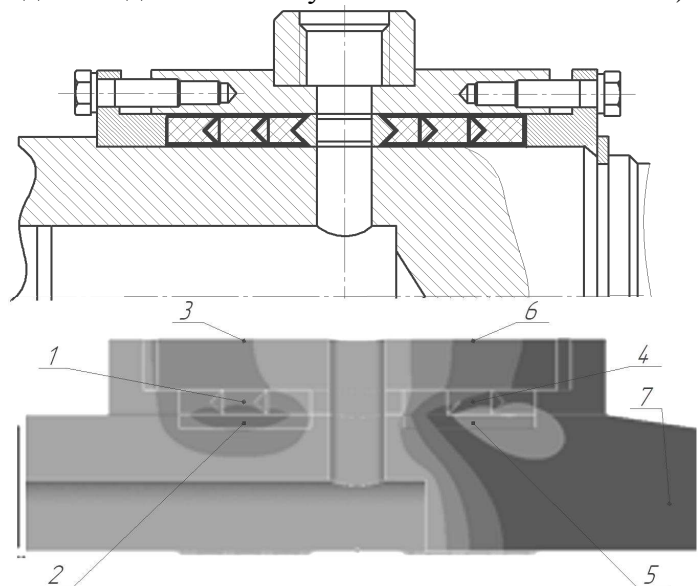


Рис. 2. Фрагмент чертежа (сверху) и точки фиксирования значений температуры (снизу) на модели передающего устройства

Результаты

По результатам моделирования получены распределения тепловых полей (рис. 3, 4), дающие представление о тепловом состоянии исследуемого устройства при изменении рассматриваемых параметров. Фиксирование значений температуры в обозначенных выше характерных точках позволяет получить соответствующие математические зависимости. Степенной регрессией получена ниже следующая зависимость для значения температуры от технологических параметров и приведенных величин:

$$T = 56 \cdot P^{0,6} \cdot n^{0,25} \cdot (D_{прив} \cdot D_{вала})^{-0,01} \cdot L_{прив}^{-0,12},$$

где T – температура, °С; P – давления рабочей жидкости, МПа; n – частота вращения вала, об/мин; $D_{прив}$ – приведенный диаметр; $D_{вала}$ – наружный диаметр вала, мм; $L_{прив}$ – приведенная длина.

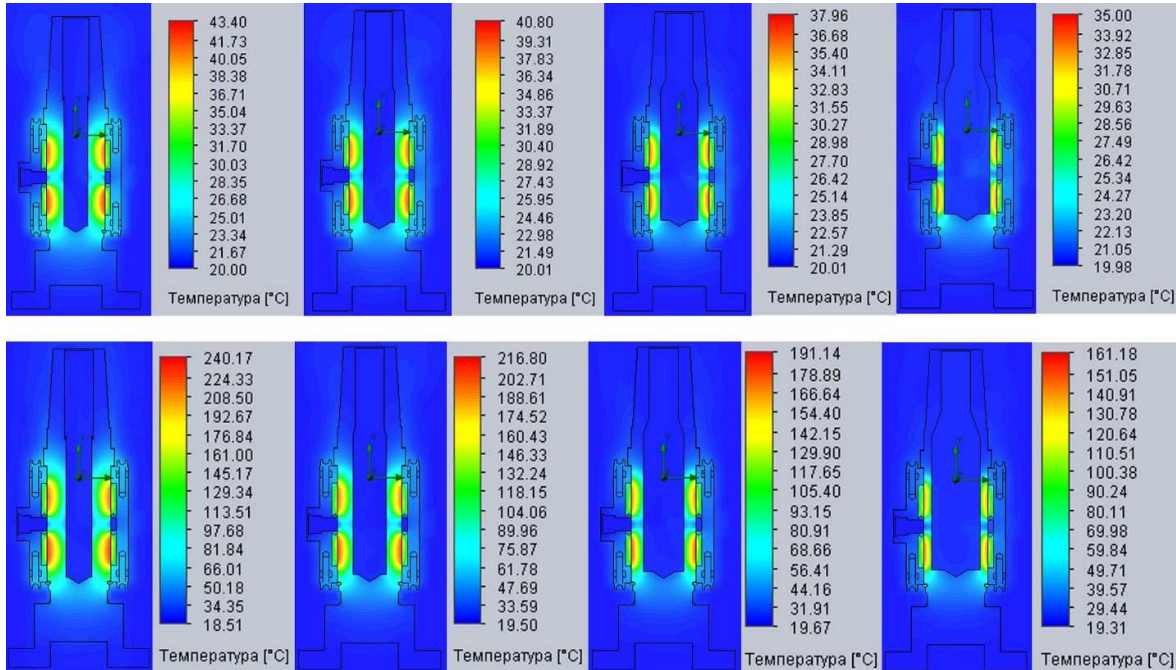


Рис. 3. Тепловое поле в передающем устройстве: $d_{внут} = 40$ мм, 52 мм, 63 мм, 75 мм (справа налево) соответственно при $n = 15$ об/мин; $l = 15$ мм; $P = 5$ МПа (верхний ряд) и $P = 100$ МПа (нижний ряд) в вычислительной среде «SolidWorks Simulation»

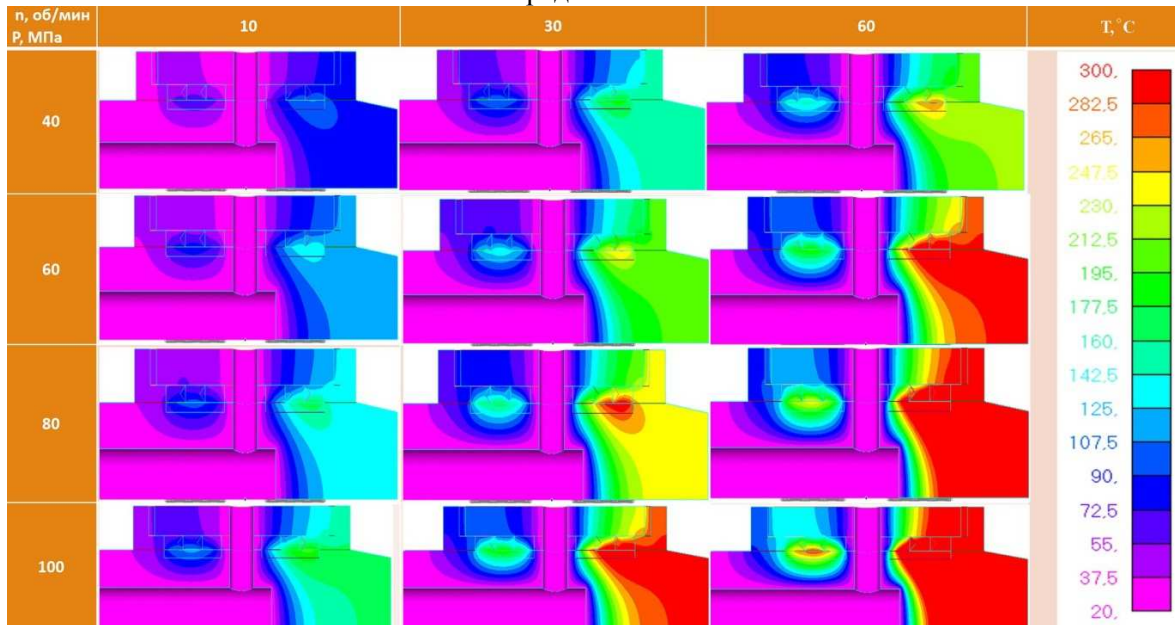


Рис. 4. Тепловое поле ($T, ^\circ\text{C}$) в передающем устройстве при изменении технологических параметров давления рабочей жидкости (P , МПа) и частоты вращения вала (n , об/мин) в вычислительной среде «Siemens Femap»

Выводы и заключение

В связи с тем, что проведение значительного количества экспериментов является процедурой длительной и довольно дорогостоящей, то представляется крайне актуальным применение имеющихся в наличии на сегодняшний день различных расчетных методов, которые реализованы с помощью современных вычислительных комплексов. Это дает возможность оценить набор характеристик рассматриваемого (проектируемого) устройства и при необходимости корректировать конструкцию для получения наиболее рационального решения, не прибегая к натурным испытаниям. В ходе моделирования удалось установить взаимосвязь значения температуры от технологических параметров, таких как, гидравлическое давление рабочей жидкости и частота вращения вала (которая по сути своей описывает частоту вращения всей буровой колонны), так и геометрических параметров с использованием безразмерных приведенных величин и получены соответствующие математические зависимости.

Финансирование. Статья публикуется по результатам исполнения гранта СПбГАСУ 2024 год.

Список литературы

1. Бреннер В.А., Жабин А.Б., Щеголевский М.М. Совершенствование гидроструйных технологий в горном производстве. – М: Горная книга, 2010. – 337 с.
2. Papakostas V., Paravantis J.A., Kontoulis N., Cazenave F., Gerbaud L., Velmurugan N. Environmental Impacts of Water-Based Fluids in Geothermal Drilling // European Geothermal Congress. Berlin, Germany, 17-21 October 2022.
3. Liu D., Xie W., Gao J., Hu S., Chen M., Li Y., Li L. Study on the Construction Method and Effects of Ipsilateral, Multi-Nozzle, High-Pressure Jet Grouting Cut-Off Wall // Sustainability. 2022, vol. 14(16), p. 10383. doi.org/10.3390/su141610383.
4. Ahmed B., Khoshnaw F.A., Raza M., Elmoneim H., Dar A.A., Shakeel A. New Type of Fluidic Oscillator Made Clean Out Operation Environment Friendly and Cost Effective – A Case Study that Converted Failure into a Success // International Petroleum Technology Conference. Riyadh, Saudi Arabia, 21-23 February 2022. doi.org/10.2523/IPTC-22265-MS.
5. Shanab I.A., Sorensen A.D. Experimental and Statistical Study of High-Pressure Water Jet “Hydro-Demolition Technique” on Concrete for Partial-Depth Concrete Bridge Deck Repair Applications // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2023, vol. 2677(12), pp. 479-489. doi.org/10.1177/03611981231168842.
6. Gerbaud L. A multifold increase in drilling performance using combined hydro-jet and percussion drilling: case study from ORCHYD project // GeoTHERM. 2023, vol. 2. URL: <https://geotherm-journal.com/index.php/gtj/article/view/77>.
7. Pourakbar M., Naziri S., Babae E. Maleknia A. A Case Study on Jet Grouting Application for Deep Excavation in Granular Soils // Geo-Congress. 2022, pp. 386-394. doi.org/10.1061/9780784484029.039.
8. Veropalumbo R., Russo F., Viscione N., Biancardo S.A. Rheological Properties Comparing Hot and Cold Bituminous Mastics Containing Jet Grouting Waste // Advances in Materials Science and Engineering. 2020, p. 8078527. doi.org/10.1155/2020/8078527.
9. 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.
10. 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.
11. Новиков В.И., Пушкарев А.Е. Возможность применения устройств для струйной цементации для укрепления грунтов в сложных климатических условиях // Техническое обеспечение доступности арктических регионов. Сборник научных трудов III Всероссийского научного семинара. – СПб.: СПбГАСУ, 2022. – С. 121-129.
12. Шевелев А.М., Зарукин А.А., Новиков В.И. Возможность влияния на тепловой баланс устройств для струйной цементации грунтов управлением геометрическими параметрами бурового вала // Перспективные машиностроительные технологии: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 171-177.
13. Новиков В.И. Влияние теплопроводности материалов контактных поверхностей на тепловой баланс элементов гидросъемника для струйной цементации грунтов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2023. – № 1. – С. 71-78. – doi.org/10.22281/2413-9920-2023-09-01-71-78.

14. Новиков В.И. Влияние морфологии контактных поверхностей на распределение температурного поля в устройствах для струйной цементации грунтов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – № 4. – С. 54-62. – doi.org/10.3103/s1052618822020108.
15. Новиков В.И. Разработка типоразмерных рядов передающих устройств для гидроструйных технологий на основе безразмерных геометрических параметров // Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». – 2024. – Т. 21, №2. – С. 180-189. – doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-180-189.

References

1. Brenner V.A., Zhabin A.B., Schegolevskiy M.M. The improving hydro-jet technologies in mining. – М.: Mountain book, 2010. – 337 p.
2. Papakostas V., Paravantis J.A., Kontoulis N., Cazenave F., Gerbaud L., Velmurugan N. Environmental Impacts of Water-Based Fluids in Geothermal Drilling // European Geothermal Congress. Berlin, Germany, 17-21 October 2022.
3. Liu D., Xie W., Gao J., Hu S., Chen M., Li Y., Li L. Study on the Construction Method and Effects of Ipsilateral, Multi-Nozzle, High-Pressure Jet Grouting Cut-Off Wall // Sustainability. 2022, vol. 14(16), p. 10383. doi.org/10.3390/su141610383.
4. Ahmed B., Khoshnaw F.A., Raza M., Elmoneim H., Dar A.A., Shakeel A. New Type of Fluidic Oscillator Made Clean Out Operation Environment Friendly and Cost Effective – A Case Study that Converted Failure into a Success // International Petroleum Technology Conference. Riyadh, Saudi Arabia, 21-23 February 2022. doi.org/10.2523/IPTC-22265-MS.
5. Shanab I.A., Sorensen A.D. Experimental and Statistical Study of High-Pressure Water Jet “Hydro-Demolition Technique” on Concrete for Partial-Depth Concrete Bridge Deck Repair Applications // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2023, vol. 2677(12), pp. 479-489. doi.org/10.1177/03611981231168842.
6. Gerbaud L. A multifold increase in drilling performance using combined hydro-jet and percussion drilling: case study from ORCHYD project // GeoTHERM. 2023, vol. 2. URL: <https://geotherm-journal.com/index.php/gtj/article/view/77>.
7. Pourakbar M., Naziri S., Babae E. Maleknia A. A Case Study on Jet Grouting Application for Deep Excavation in Granular Soils // Geo-Congress. 2022. pp. 386-394. doi.org/10.1061/9780784484029.039.
8. Veropalumbo R., Russo F., Viscione N., Biancardo S.A. Rheological Properties Comparing Hot and Cold Bituminous Mastics Containing Jet Grouting Waste // Advances in Materials Science and Engineering. 2020, p. 8078527. doi.org/10.1155/2020/8078527.
9. Golovin K.A., Malikov A.A., Pushkarev A.E. Thermal mode of operation of high-pressure hydraulic puller at hydro jet grouting installations // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2015, no. 4, pp. 46-52.
10. Golovin K.A. Development of the design of the extender piercing installation for fixing unstable rocks // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2013, no. 1, pp. 326-329.
11. Novikov V.I. Pushkarev A.E. The possibility of using jet grouting devices to strengthen soils in difficult climatic conditions // Technical support for accessibility of Arctic regions: Proceedings of the III Russian Scientific Seminar. – SPb.: SPbSUACE, 2022. – P. 121-129.
12. Shevelev A.M., Zarubin A.A., Novikov V.I. Possibility of influencing the thermal balance of jet-grouting devices by controlling the drill shaft's geometric parameters // Advanced mechanical engineering technologies: International Scientific and Practical Conference. – SPb.: POLITECH-PRESS, 2022. – P. 171-177.
13. Novikov V.I. The effect of the thermal conductivity by the materials of contact surfaces on the heat balance of the jet-grouting drill stem hydraulic elements. // Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University. 2023, no. 1, pp. 71-78. doi.org/10.22281/2413-9920-2023-09-01-71-78.
14. Novikov V.I. The Effect of the Morphology of Contact Surfaces on the Temperature Field Distribution in Devices for Jet-Grouting of Soils // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2022, no. 51(4), pp. 329-335. doi.org/10.3103/s1052618822020108.
15. Novikov V.I. Standard series of transmitting equipment for hydra-jet technology based on dimensionless geometric parameters development // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024, vol. 21, no. 2, pp. 180-189. doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-180-189.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Новиков Виталий Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Судебных экспертиз	Novikov Vitaly Ivanovich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of forensics
Кузьмин Олег Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Технологии строительных материалов и метрологии	Kuzmin Oleg Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of technology of building materials and metrology
vitalynewage@gmail.com	

Получена 08.07.2024