

УДК (UDC) 69.002.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ГИДРОСТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ

## RESEARCH OF CHANGES HYDRO-PULLER DEVICE INTERNAL CAVITIE'S GEOMETRY FOR ORDER TO IMPROVE THE THERMAL STATE

Новиков В.И.

Novikov V.I.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Россия)  
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint-Petersburg, Russia)

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию влияния изменений геометрических характеристик, таких как диаметр и длина, внутренней полости для подвода рабочей жидкости в передающих устройствах высокого давления для гидроструйных технологий на изменение их теплового баланса в процессе эксплуатации за счет улучшения условий охлаждения участков бурового вала с контактными поверхностями. Моделирование проводилось не на полномасштабном передающем устройстве, а на одной восьмой части для того чтобы уменьшить время как создания самой модели, так и объем вычислений, что возможно благодаря осесимметричности поставленной задачи. Показана модель, созданная в вычислительной среде «Ansys» с расчетной сеткой для расчета эквивалентных напряжений. Расчетные методом конечных элементов распределения напряжений для различных сочетаний геометрии передающего устройства выявили соответствующие границы рационального изменения диаметра и длины внутренней полости, позволяющие обеспечить его работоспособность конструктивного узла в сочетании с максимальным охлаждением максимально термически нагруженных участков вала. Введены безразмерные геометрические параметры (приведенный диаметр и приведенная длина внутренней полости) для обобщающего описания геометрии передающих устройств для гидроструйных технологий. Получены графики зависимостей величин напряжений от приведенных величин.

**Ключевые слова:** гидроструйные технологии, струйная цементация, моделирование, буровой став, тепловой баланс, метод конечных элементов.

**Дата получения статьи:** 27.06.2024  
**Дата принятия к публикации:** 29.08.2024  
**Дата публикации:** 25.09.2024

**Сведения об авторе:**

**Новиков Виталий Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры Судебных экспертиз, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», e-mail: vitalynewage@gmail.com.

ORCID: 0000-0002-4472-8218

**Abstract.** The paper is devoted to the study of the influence on changes in their thermal balance during operation by improving the cooling conditions of sections of the drill shaft with contact surfaces of changes in geometric characteristics, such as diameter and length, of the internal cavity for supplying working fluid in high-pressure hydro-puller device for hydro-jet technologies. The axisymmetric simulation not on a full-size transmitting device was carried out, but on one-eighth part in order to reduce the time of both creating the model itself and the amount of calculations. A model created in the computing environment "Ansys" with a computational grid for calculating equivalent stresses is shown. The stress distributions calculated by the finite element method for various combinations of the geometry of the transfer device revealed the corresponding boundaries for the rational change in the diameter and length of the internal cavity, allowing to ensure its operability of the structural unit in combination with maximum cooling of the most thermally loaded sections of the shaft. Dimensionless geometric parameters (reduced diameter and reduced length of the internal cavity) are introduced for a general description of the geometry of transmitting devices for hydro-jet technologies. Graphs of the dependences of voltage values on the given values were obtained.

**Keywords:** hydro-jet technologies, jet-grouting, modeling, drilling bar, heat balance, finite element method.

**Date of manuscript reception:** 27.06.2024  
**Date of acceptance for publication:** 29.08.2024  
**Date of publication:** 25.09.2024

**Author's information:**

**Vitaly I. Novikov** – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor of Department of Forensics at Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, e-mail: vitalynewage@gmail.com.

ORCID: 0000-0002-4472-8218

### Благодарности

Статья публикуется по результатам исполнения гранта СПбГАСУ 2024 год.

### Acknowledgements

The article is published based on the results by the implementation of the SPbGASU grant 2024.

## 1. Введение

Гидроструйные технологии нашли применение в широком спектре отраслей промышленности благодаря своим возможностям. Используемый в качестве «инструмента» поток воды под высоким давлением высоко эффективно решает различные задачи такие как разрушение, очистка или придание формы различным материалам, начиная от горных пород и до металлических изделий, демонстрируя исключительную универсальность при обработке различных материалов, включая металлы, пластики, композиты, камень и керамику [1, 2]. Подобная адаптируемость делает данные технологии крайне востребованными, а иногда и незаменимыми для отдельных видов производств [3-6].

В строительной отрасли, наиболее востребованной является гидроструйная технология реализующая закрепление слабых или неустойчивых грунтов – это технология струйной цементации [7, 8]. Данная технология получила значительное развитие в последние пару десятилетий в силу того, что как одна из гидроструйных, технология струйной цементации грунтов является экологически чистой альтернативой многим традиционным методам обработки материалов, что делает ее привлекательной 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. Однако присутствуют и недостатки присущие отдельным видам гидроструйных технологий, так, например, некоторые имеют ограниченная по глубине воздействия и не подходят для обработки материалов на большой глубине, другие могут быть достаточно шумными и в целом иметь высокую стоимость оборудования. Последний аспект определил имеющиеся на сегодняшний день значительное количество ис-

следований как параметров самой технологии, причем в последнее время наметилась тенденция не ограничиваться традиционной областью применения [9], так и используемого оборудования.

Стандартная схема предполагает наличие насоса, для создания давления требуемого уровня, сопла – для формирования струи рабочей жидкости и передаточных элементов. Наименьшей надежностью в данной цепочке обладают как раз передающий давление узел, а именно гидросъемник [10]. Сложилась такая ситуация из-за особенностей его функционирования, так как назначение этого предающего элемента предавать рабочую жидкость к вращающемуся струеформирующему узлу от неподвижного насоса.

По результатам предыдущих исследований [11, 12] было выявлено, что происходит накопление тепловой энергии в той части узла (условно «левой»), где отсутствует наличие центрального отверстия, служащего для подвода рабочей жидкости и одновременно выполняющего охлаждающие функции для моделируемого изделия путем обеспечения непрерывного отвода рабочей жидкостью выделяющейся теплоты из зоны контакта поверхностей вала и уплотнительного элемента.

Соответственно изменение геометрических параметров центрального отверстия, т.е. увеличение диаметра может привести к увеличению теплоотвода для уже охлаждаемого уплотнительного элемента, а увеличение длины центрального отверстия – к обеспечению удаления избыточного тепла и прекращению его аккумуляции в зоне второго уплотнительного элемента, таким образом данные изменения позволят обеспечить более благоприятные условия теплового нагружения для рассматриваемого устройства.

## 2. Задачи и методика исследования

Исследование осуществлялось путем проведения вычислительного эксперимента

напряженно-деформированного состояния конструкции гидросъемника в современной программной среде комплекса «Ansys», реализующего численные методы решения конечными элементами.

Выбранный вычислительный пакет программного обеспечения дает возможность применять различные инструменты, позволяющие работать с заданием различных нагрузок, граничных условий и т.д. Также есть возможность подгружать модели и данные созданные в иных CAD-системах, однако потенциально может привести к проблемам с реализацией геометрии, что в целом решается также за счет ряда инструментов, с помощью которых можно найти и удалить потенциально проблему, т.е. удалить или упростить конфликтующие элементы. При наличии возможности, например, при решении осесимметричной задачи, можно снизить объем вычислений путем создания 3D-модель не целиком всего объекта, а использовать лишь его часть (половину, четверть и т.д.). «Ansys» может учитывать разнообразные конструктивные нелинейности и позволяет решить общий случай напряженно-деформированного состояния объекта исследований и в качестве базовой принята созданная 3D-модель [11] представленная на рис. 1.

Моделируемый конструктивный узел представляет собой передающее устройство для струйной цементации грунтов, состоящее из вала с наружным диаметром 100 мм, по которому рабочая жидкость подается во вращающийся струеформирующий инструмент, а, значит, вал также должен совершать вращательное движение, неподвижных пакетов уплотнительных элементов, препятствующих вытеканию рабочей жидкости (в данном случае водно-цементной смеси) за пределы механизма, а также неподвижного корпуса с отверстием для подачи рабочей жидкости  $\varnothing 20$  мм и механизма поджатия с двух сторон (крышки с 8 болтами)

Материалы выбраны соответственно аналогичной модели [11, 12] и представляют собой коррозионностойкую сталь 40X13 для металлических компонентов и полиамид ПА-6 («капролон») – для неметаллических уплотнительных компонентов конструкции. Давление водно-цементной смеси во внут-

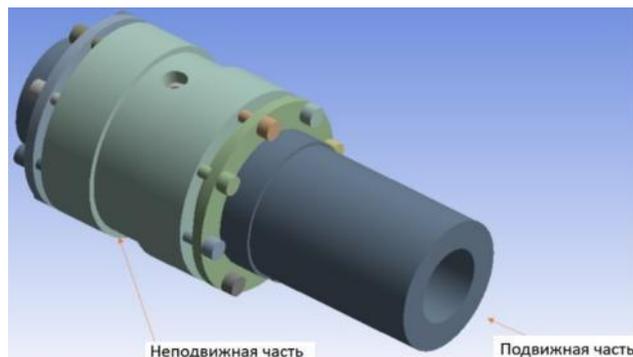


Рис. 1. 3D-модель конструктивного узла в сборе

ренней полости, т.е. нагрузка задана дискретным рядом: 60, 70, 80, 90, 100 МПа, без учета влияния обработки или каких-либо иных особых состояний поверхностных слоев, моделируемых объектов [13]. Для универсализации получаемых результатов моделирования целесообразно изменять не внутренний диаметр и длину полости вала как таковой, а оперировать безразмерными приведенными величинами диаметра и длины ( $D_{\text{прив}}$  – отношение действительного значения диаметра вала к базовому значению диаметра вала (100 мм) и  $L_{\text{прив}}$  – отношение действительного значения глубины полости, измеряемой от входного отверстия для подачи рабочей жидкости в сторону противоположную движению ее основного потока, к значению длины комплекса уплотнительных элементов (50 мм)), что позволяет использовать полученные данные для любых аналогичных устройств, применяемых в гидроструйных технологиях.  $D_{\text{прив}}$  задавался 0,5, 0,55, 0,6, 0,65, 0,7 и  $L_{\text{прив}}$  принимался равным 1,56, 1,66, 1,76, 1,86, 1,96.

В связи со значительным количеством конечных элементов для имеющейся модели (около 7,13 миллионов узлов и 4,5 миллиона элементов), вычисление производилось для одной восьмой части (рис. 2), что является обоснованным решением для осесимметричной задачи.

Для проведения расчетов требовалось определить и задать граничные условия, схемы которых представлены на рис. 3 и представляют собой: приложенное давление во внутренней полости «pressure»; ограничение в окружном перемещении «frictionless support»; жесткая заделка «fixed support»;

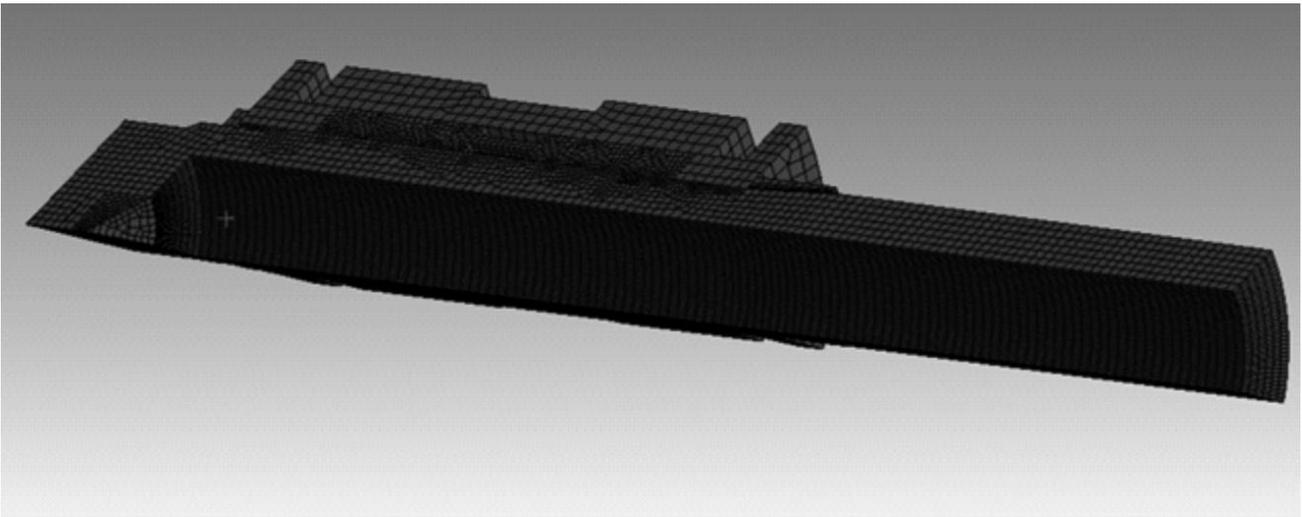


Рис. 2. Расчетная сетка (показана одна восьмая часть конструкции)

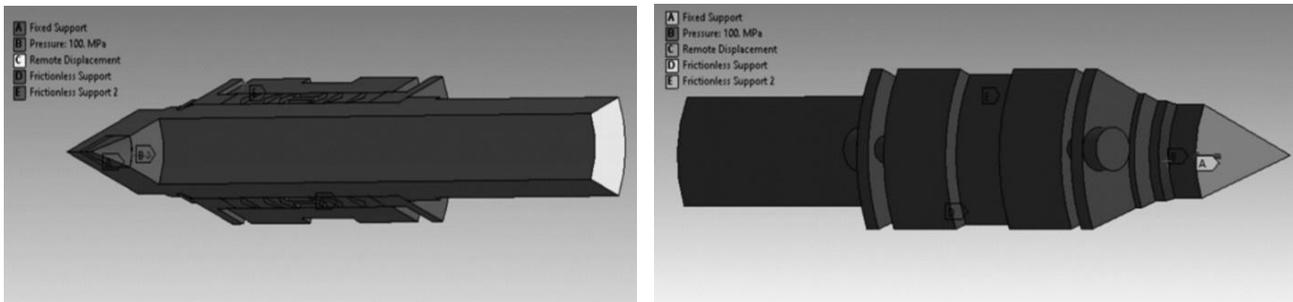


Рис. 3. Схема использованных граничных условий: справа – приложенное давление во внутренней полости; слева – «жесткая заделка»

удаленная на расстояние жесткая заделка «remote displacement».

### 3. Результаты и анализ моделирования

Проведенные вычисления выявили картину распределения значений величины эквивалентных напряжений по фон Мизесу в исследуемом гидросъемнике. Результат расчета для значений давления рабочей жидкости ( $P$ ) в 100 МПа, приведенного диаметра ( $D_{\text{прив}}$ ) – 0,7 и приведенной длины ( $L_{\text{прив}}$ ) – 1,6 показан на рис. 4.

Полученные результаты для исследуемого спектра параметров позволяют говорить о том, буровой вал обладает прочностным потенциалом для изменения геометрии внутренней полости, что может позволить подобрать такие значения для приведенных геометрических величин, которые способны повлиять на тепловой баланс в гидросъемнике для смещения его в сторону снижения тем-

пературы эксплуатации уплотнительных элементов за счет рационального расширения внутренней полости и обеспечения увеличения теплоотвода из зоны контакта поверхностей вала и уплотнительных элементов и соответственно обеспечения более лучшего охлаждающего режима.

Соответствующие графики зависимостей напряжений от приведенного диаметра и приведенной длины показаны на рис. 5.

Представлены графики (рис. 5) показывают два основных момента. Первый это очевидное влияние на уровень напряжений изменение диаметра внутренней полости, при увеличении которого происходит увеличение площади давления и, следовательно, рост уровня напряжений в металле элемента конструкции. Полученная зависимость, при задании коэффициента запаса (например, порядка 1,5...2) даст проектировщику граничное значение для любой комбинации приведенного диаметра и выбранного мате-

риала вала гидросъемника для выбора рационального сочетания значений наружного

диаметра вала и диаметра внутренней полости в нем.

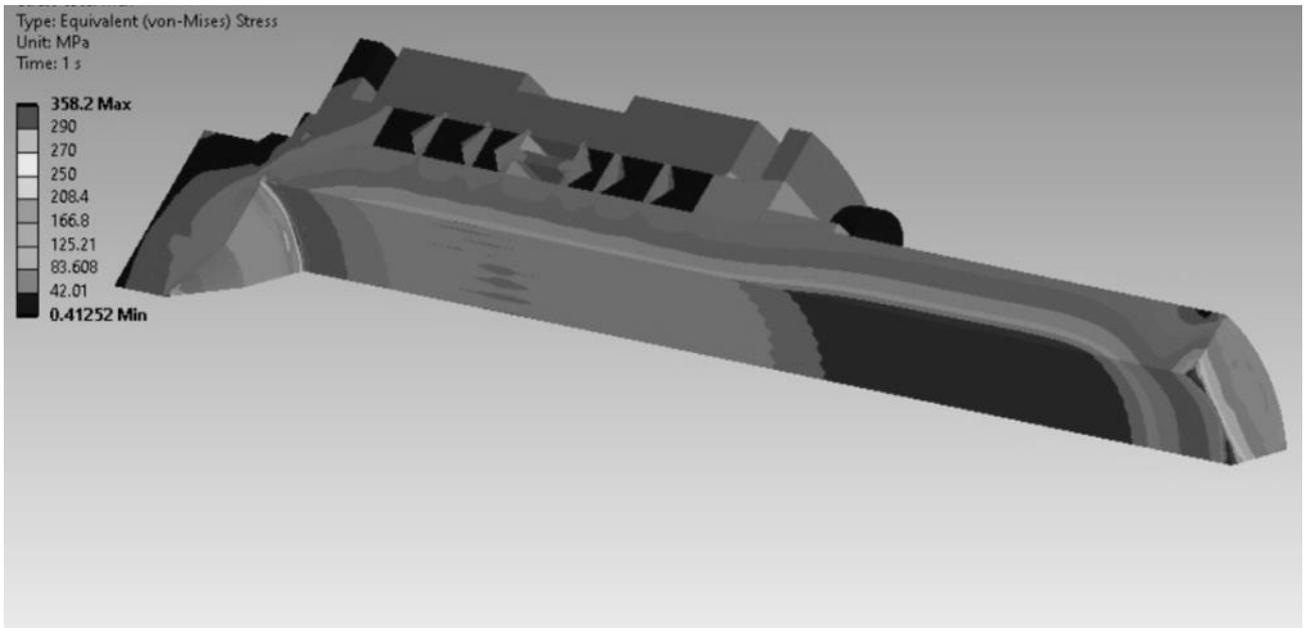


Рис. 4. Распределение значений полученных эквивалентных напряжений для  $P = 100$  МПа,  $D_{\text{прив}} = 0,7$ ,  $L_{\text{прив}} = 1,6$

С другой стороны, изменение длины полости крайне незначительно влияет на прочностные характеристики изделия. Связано это с тем, что можно практически неограниченно наращивать длину самого вала в направлении «левого» уплотнительного элемента и при необходимости можно сколько угодно увеличивать глубину внутренней полости и соответственно толщину стенки за счет прироста длины самого вала. Выбор рациональных величин приведенный длины будет зависеть от того насколько эффективно будет происходить охлаждение рабочей жидкости при росте длины внутренней полости и при недостатке охлаждения оптимальным решением здесь возможно будет ограничиваться непосредственно длиной самого пакета уплотнений с запасом около 15%, таким образом, конструируя вал с перекрытием внутренней полости длины уплотнительных элементов. Однако здесь возникает вопрос о влиянии выбираемой геометрии на скорости течения рабочей жидкости,

возникновения турбулентных или застойных зон, что требует дополнительного моделирования гидродинамических процессов.

## 5. Заключение

Выполненные исследования позволили определить уровни напряжения в элементах гидросъемника и выявили предельные значения прочности от технологического параметра, т.е. давления рабочей жидкости и геометрии бурового вала, описываемой обобщенными безразмерными характеристиками.

Полученные результаты дают возможность проектировать рассмотренное передающее устройство с учетом особенностей геометрии элементов устройства для обеспечения более лучших условий работы уплотнительных элементов и соответственно более продолжительную эксплуатацию самого конструктивного узла и всей гидроструйной установки в целом.

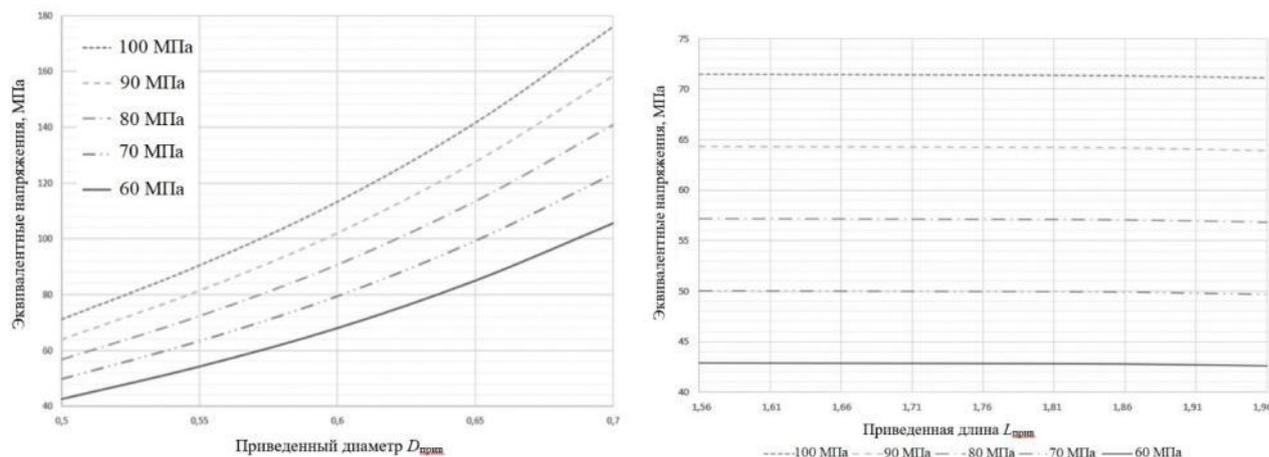


Рис. 5. Графики зависимостей напряжений: справа – от приведенного диаметра; слева – от приведенной длины

### Список литературы

1. Бреннер В.А., Жабин А.Б., Щеголевский М.М. Совершенствование гидроструйных технологий в горном производстве. Москва: Горная книга, 2010. 337 с.
2. Borkowski P. Hydro-jetting method of bas-relief shaping // *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2011, Vol. 11, Issue 2, 2011, P. 267. DOI: 10.1016/S1644-9665(12)60142-3
3. 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.
4. 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/ 14(16):10383. DOI: 10.3390/su141610383
5. 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: 10.2523/IPTC-22265-MS
6. 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*

### References

1. Brenner V.A. The improving hydro-jet technologies in mining. Moscow, 2010. 337 p. (In Russian)
2. Borkowski P. Hydro-jetting method of bas-relief shaping. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2011, Vol. 11, Issue 2, 2011, P. 267. DOI: 10.1016/S1644-9665(12)60142-3
3. 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.
4. 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, 14(16): 10383. DOI: 10.3390/su141610383
5. 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: 10.2523/IPTC-22265-MS
6. 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 V. 2677, Issue 12, 2023. DOI: 10.1177/03611981231168842

7. Gerbaud L. A multifold increase in drilling performance using combined hydro-jet and percussion drilling: case study from ORCHYD project // *GeoTHERM*, V. 2, 2023.

8. Pourakbar M., Naziri S., Babae E. Maleknia A. A Case Study on Jet Grouting Application for Deep Excavation in Granular Soils // *Geo-Congress*. 2022. P. 386-394 DOI: 10.1061/9780784484029.039

9. 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*. Volume 2020. 8078527. 16 p. DOI: 10.1155/2020/8078527

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. Шевелев А.М. 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, Санкт-Петербург 21–25 ноября 2022 г. /ПОЛИТЕХ-ПРЕСС/ – Санкт-Петербург, 2023. С. 171-177.*

12. 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: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-71-78

13. 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: 10.3103/s1052618822020108

*Research Board*. V.2677, No. 12, 2023. DOI: 10.1177/03611981231168842

7. Gerbaud L. A multifold increase in drilling performance using combined hydro-jet and percussion drilling: case study from ORCHYD project. *GeoTherm*, Vol.2, 2023.

8. Pourakbar M., Naziri S., Babae E. Maleknia A. A Case Study on Jet Grouting Application for Deep Excavation in Granular Soils. *Geo-Congress*. 2022. P. 386-394 DOI: 10.1061/9780784484029.039

9. 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*. Volume 2020. 8078527. 16 p. DOI: 10.1155/2020/8078527

10. 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).

11. Shevelev A.M. Possibility of influencing the thermal balance of jet-grouting devices by controlling the drill shaft's geometric parameters. *Trudy Perspektivnye mashinostroitelnye tekhnologii*, 2023. pp. 171-177.

12. 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. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2023, No.1, pp. 71-78. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-71-78/ (In Russian).

13. 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: 10.3103/s1052618822020108