

УДК (UDC) 69.002.5

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ КОНТАКТНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОСЪЕМНИКА
ДЛЯ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВTHE EFFECT OF THE THERMAL CONDUCTIVITY BY THE MATERIALS OF CON-
TACT SURFACES ON THE HEAT BALANCE OF THE JET-GROUTING DRILL STEM
HYDRAULIC ELEMENTSНовиков 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. В работе рассматриваются вопросы влияния теплопроводности и как следствие материалов контактных поверхностей бурового вала и уплотнительного элемента на изменение теплового баланса конструктивного узла «буровой став», используемого в технологии струйной цементации для закрепления слабых и неустойчивых видов грунтов. Показана модель с узлами для расчетной сетки сборочного узла «гидросъемник», частью которого являются рассматриваемые буровой вал и уплотнительные элементы. Рассчитаны методом конечных элементов в среде «Siemens Femap» значения температуры в зависимости от изменения коэффициентов теплопроводности контактирующих элементов. Расчеты проводились для четвертой части указанной модели, в силу осесимметричности решаемой задачи, что позволило в значительной степени сократить объем и время вычислений. Построены графики соответствующей зависимости для ряда точек, расположенных в характерных областях гидросъемника. Полученные данные аппроксимированы степенной регрессией, позволяющей вычислить значения температуры в указанных областях, рассматриваемого сборочного узла и провести экстраполяцию в дальнейшем, что позволит подбирать материал для бурового вала гидросъемника исходя из оптимального соотношения коэффициента теплопроводности вала, его коррозионной стойкостью, определяемых химическим составом стали и коэффициентом теплопроводности уплотнения.

Ключевые слова: струйная цементация, буровой став, уплотнительный элемент, моделирование, тепловой баланс, коэффициент теплопроводности.

Дата принятия к публикации: 03.02.2023
Дата публикации: 25.03.2023

Сведения об авторах:

Новиков Виталий Иванович – кандидат технических наук, доцент, кафедра Судебных экспертиз, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государст-

Abstract. The paper is deals with the influence of thermal conductivity and the materials of the contact surfaces of the drill shaft and the sealing element on the change in the thermal balance of the structural unit "drilling string" used in the jet grouting technology to fix weak and unstable types of soils. A model with nodes for the computational grid of the "hydraulic puller" assembly unit is shown, part of which are the considered drill shaft and sealing elements. The temperature values are calculated by the finite element method in the «Siemens Femap's» environment depending on the change in the thermal conductivity coefficients of the contacting elements. Calculations were carried out for the fourth part of the indicated model, due to the axisymmetry of the problem being solved, this made it possible to significantly reduce the amount and time of calculations. Graphs of the corresponding dependence are constructed for a number of points located in the characteristic areas of the hydraulic stripper. Also, by power regression, expressions were obtained that allow calculating the temperature values in the indicated areas of the considered assembly. The obtained dependencies will make it possible in the future to select the material for the drill shaft of the hydraulic puller based on the optimal ratio of the thermal conductivity of the shaft, its corrosion resistance, determined by the chemical composition of the steel and the thermal conductivity of the sealing.

Keywords: jet grouting, drilling bar, sealing, modeling, heat balance, thermal conductivity.

Date of acceptance for publication: 03.02.2023
Date of publication: 25.03.2023

Author's information:

Novikov Vitaly Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Forensics at Saint-Petersburg State University of Architec-

венный архитектурно-строительный университет»,
e-mail: vitalynewage@gmail.com.

ture and Civil Engineering,
e-mail: vitalynewage@gmail.com.

1. Введение

В строительной отрасли из всех инъекционных технологий для закрепления слабых и неустойчивых грунтов в процессе строительства крайне востребована технология струйной цементации [1 - 3]. Суть данной технологии заключена в следующем – на месте производства строительных работ происходит наполнение полостей цементным раствором, который формирует грунтоцементные (или грунтобетонные) сваи диаметром 0,4...2,5 м, с параллельным созданием этих пустот за счет разрушения грунтов струями подаваемого цементного раствора. Для осуществления непосредственно инъекции цемента первоначально необходимо пробурить пилотную скважину диаметром 100...125 мм (т.е. имеет место малый диаметр бурения) на требуемую глубину, что реализуется обычно буровой установкой для струйной цементации и на обратном ходе происходит подъем бурового става (колонны), который продолжает вращаться, с подачей через него раствора под давлением 40...70 МПа. Частицы раствора попадают в грунт и перемешиваются с образованием грунтоцементной смеси. На данном этапе возможно размещение в не затвердевшей свае упрочняющего армирующего элемента. При затвердевании же формируется грунтобетонная колонна с прочностью на сжатие порядка 10 МПа, чьей вяжущей составляющей, как правило, является цемент стандартных марок. Таким образом, особенности строительного производства с использованием технологии струйной цементации позволяют обойтись без обсадной трубы и выполнить требуемый объем работ быстрее и эффективнее аналогичных технологий, что конечно отражается на степени востребованности технологии, выражаемой в различных областях применения струйной цементации. В первую очередь она идеальна для использования в условиях плотной городской застройки, т.к. не сопровождается ни динамическими воздействиями, ни вибрациями, а значит, отсутствуют воздействия

на соседние здания. Так же можно производить устройство или укрепление фундаментов зданий и сооружений и подпорных стенок, заглубление подвалов, укрепление стенок котлованов. Струйной цементацией организуют противодействия оползневым процессам, создают противодиффузионные завесы и осуществляют заполнение промышленных выработок или карстовых пустот. Применяется струйная цементация и для создания буровых инъекционных свай при строительстве новых зданий, сооружений или каких-либо объектов, коррекции плотности грунтов в процессе проектирования фундаментов и формировании разьединительных стенок для исключения деформаций. Отдельно стоит упомянуть такой момент, как небольшие габариты оборудования, а значит, есть возможность проводить работы в стесненных условиях (при высоте рабочей зоны от 1,8 м и ширине – 1,5 м) и активно использовать технологию для закрепления грунтов при проходке тоннелей, например, в метростроении. Но использование струйной цементации не ограничивается только выше перечисленными областями, но последнее время находит и довольно нестандартное применение [4].

На сегодняшний день основными производителями и поставщиками оборудования являются компании таких стран как Германия и Италия, установки для горизонтального бурения производятся так же и в КНР, поэтому проектирование различного рода устройств и оборудования, функционирующих в рамках этой технологии являются актуальными и востребованными [5, 6]. Основными составляющими классической конструктивной цепочки являются источник высокого давления, средства передачи высоконапорной струи водно-цементного раствора, технологический инструмент. Опыт эксплуатации показал, что наиболее уязвимым местом являются средства передачи высоконапорной струи цементного раствора и в частности «гидросъемник», чье функциональное назначение состоит в том, чтобы соединить вра-

щающийся инструмент (гидромонитор) с не вращающейся магистралью высокого давления с [7]. Отсюда возникающее в процессе эксплуатации по контактными поверхностям этого устройства значительное тепловыделение, приводящее к поломкам, т.е. к выходу его из строя. Таким образом, именно тепловой баланс в процессе работы гидросъемника определяет эксплуатационные характеристики всей цепочки.

2. Постановка задачи

Основываясь на ранее разработанных методиках и проведенном моделировании распределения теплового поля, а также полученных значений распределения температуры в рассматриваемом узле [6, 8 - 10], необходимо отметить, что наибольшее количество тепла скапливается со стороны одного из уплотнительных элементов, где отсутствует центральное отверстие и очевидно, что условия эксплуатации для этого элемента будут хуже, чем того, который находится под влиянием охлаждающего воздействия, проходящей по центральному отверстию, водно-цементной смеси. При таком распределении теплового поля немаловажную роль в образовании теплового баланса будет играть величина теплопроводности элементов гидросъемника, т.е. материалы из которых изготовлены детали с контактирующими поверхностями. Таким образом, актуальным будет являться моделирование распределения значений температуры при изменении значений коэффициентов теплопроводности, как бурового вала, так и уплотняющего элемента.

3. Разработанные модели

Для решения необходимой задачи существует ряд современных системы автоматизированного проектирования, с помощью которых можно моделировать физико-механические нагрузки, в чьей основе заложен метод конечных элементов, т.е. численные решения дифференциальных уравнений в частных производных или интегральных уравнений. Каждая такая система направлена решение конкретных задач на достаточно

точном уровне и позволяет определить влияние интересующих факторов на моделируемую систему. Поскольку создание геометрии составляет значительную часть времени по сравнению с подготовкой, разбиением конечно-элементной сетки и непосредственно самим расчетом, то вычислительная часть моделирования (рассматриваемая 3D-модель представлена на рис. 1) конструктивного узла «гидросъемник» реализована в программной среде «Siemens Femap». Данное программное обеспечение способно эффективно работать с данными полученными из САД-систем и что является очень удобным программным функционалом, имеющиеся многочисленные инструменты позволяют найти и удалить потенциально проблему с геометрией, т.е., например, просто убрать нежелательные детали.

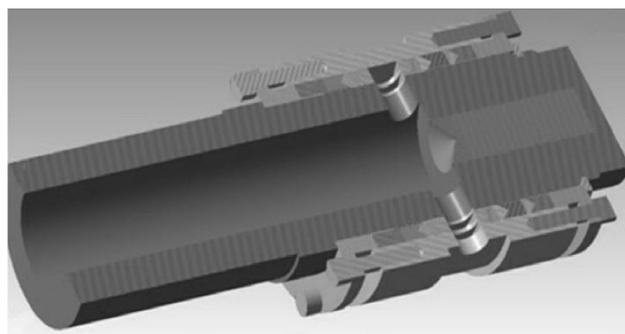


Рис. 1. 3D-модель гидросъемника в сечении

Кроме перечисленного, «Femap» предоставляет ряд возможностей по сеточному разбиению, такие как интерактивная подготовка и коррекция геометрии для разбиения, включая расщепление поверхностей и их смещение в сочетании с редкой функцией сшивания твердых тел при подготовке модели и ручным подавлением особенностей геометрии. С применением некоторых из этих функций построена конечно-элементная модель. Элементы были заданы в форме тетраэдра и куба, а в местах сопряжения поверхностей различных деталей, входящих в конструктивный узел, разбиение производилось вручную в виде куба для более правильного описания теплопередачи между расчетными элементами со сгущением по области уплотнительных элементов. Конечно-элементная

сетка (рис. 2) содержит около 1,53 миллиона элементов (на четвертую часть гидросъемника).

В состав гидросъемника входят вращающийся буровой вал ($\varnothing 155$ мм) с внутренним глухим отверстием; отверстия ($\varnothing 20$ мм), че-

рез которые проводится подача водно-цементной смеси во внутреннюю полость и неподвижных корпуса; два пакета уплотнительных элементов, расположенных симметрично относительно отверстия и соответственно двух крышек с зажимающими элементами.

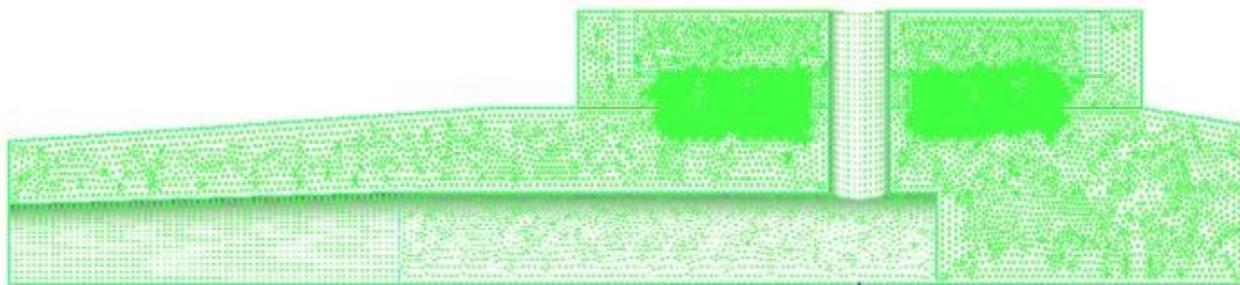


Рис. 2. Узлы расчетной сетки

В качестве материалов, заданы физико-механические характеристики: металлические части соответствуют коррозионно-стойкой стали аустенитного класса, для уплотнительных элементов – полимера «капрон» (ПА-6). Термическая нагрузка задавалась в местах контакта уплотнительных элементов и вала, исходя из известной тепловой мощности [8], выделяющейся при давлении P рабочей жидкости (водно-цементной смеси) в 60 МПа. Значения коэффициентов теплопроводности рассматривались в диапазонах 15,5...16,5 для стали $k_{ст}$ и 0,24...0,3 для капрона $k_{уп}$. Также был задан ряд других параметров, необходимых для проведения расчета, таких как частота вращения вала n , которая составила 10 об/мин и соответствующая ей линейная скорость перемещения точек вала относительно неподвижных точек уплотнительных элементов равная 0,08 м/с и коэффициент трения между ними $k=0,1$. Хотя такая величина коэффициент трения и соответствует наиболее благоприятной схеме контакта поверхностей и даже скорее описывает несколько идеализированное взаимодействие стали и капрона, в связи с тем, что несмотря на наличие жидкости, речь идет не о воде, а о смеси с частицами цемента в своем составе. Однако применение минимального значения коэффициент трения является возможным, так как он влияет лишь на величину выделяющейся те-

пловой мощности [8], к тому же стали аустенитного класса обладают довольно низким коэффициентом теплопроводности относительно сталей других классов, поэтому в данном случае высокое тепловыделение будет излишним и более целесообразно применять именно выше указанное значение коэффициента трения.

4. Результаты и их анализ

Поскольку задача является осесимметричной, то для сокращения общей трудоемкости и времени расчета рассматривалась четвертая часть конструкции. Получена общая картина теплового поля (рис. 3), формирующегося в гидросъемнике в процессе эксплуатации при выше указанных технологических параметрах, которая хорошо согласуется по характеру распределения теплового поля и по количественному значению распределения значений температуры, как с предварительно проведенными расчетами [8, 10], так и с моделью, созданной и рассчитанной в программной среде «Ansys» [6].

Кроме того выполненный расчет, позволяет провести аппроксимацию имеющихся данных и получить математическую зависимость значения температуры от значения коэффициентов теплопроводности вала и уплотнительного элемента.

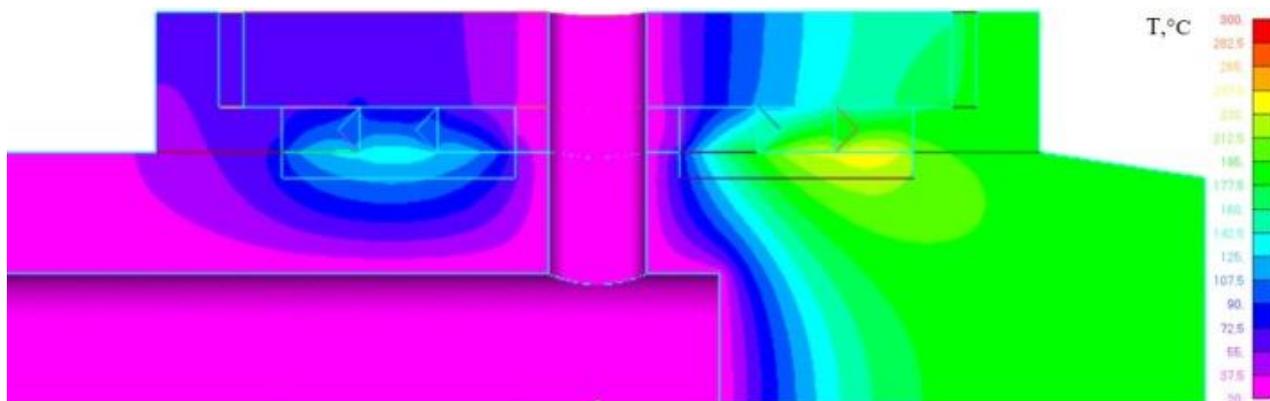


Рис. 3. Тепловое поле в гидросъемнике при $P=60$ МПа, $n=10$ об/мин, $k=0,1$

Исходя из того, что невозможно рассматривать каждую точку теплового поля в гидросъемнике, то рационально остановиться на некоторых характерных точках, изменение температуры (или наличие постоянного значения оной) в которых было бы наиболее информативным с точки зрения описания теплового баланса устройства. Для чего были выбраны семь точек, в которых определялось численное значение для температуры (рис. 4): четыре точки – справа и слева относительно входного отверстия для подачи водно-цементной смеси в местах контакта вала и уплотнительных элементов соответственно (т. 1, т. 2, т. 4, т. 5) как области наиболее термически нагруженные; две точки – справа и слева от отверстия для водно-цементной смеси в периферийной области (т. 3, т. 6) как области доступные для наружного контроля; одна точка в месте аккумуляции выделяющегося тепла (т. 7).

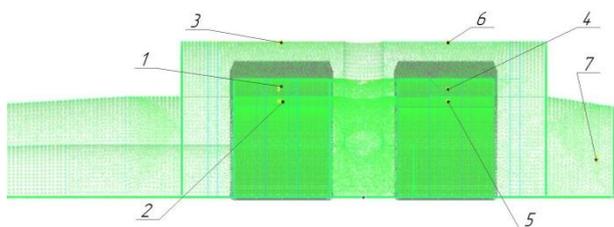


Рис. 4. Расчетные точки значений температуры в гидросъемнике

Аппроксимация множественной степенной регрессией позволяет наглядно представить влияние коэффициентов теплопроводности на температуру, что и продемонстрировано на графиках серией плоскостей (рис. 5).

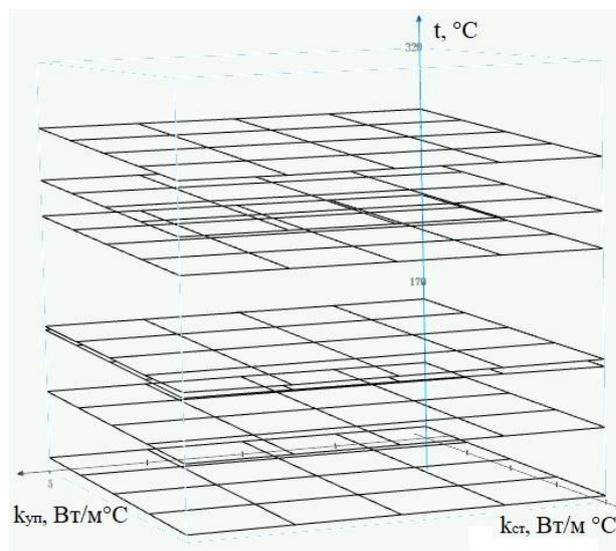


Рис. 5. Графики зависимости температуры от изменения коэффициентов теплопроводности вала и уплотнительного элемента для точек (сверху вниз): т.5, т.7, т.4, т.2, т.6, т.1, т.3

Изменение коэффициента теплопроводности уплотнительного элемента не оказывает практически никакого влияния на изменение значения температуры для всех рассматриваемых точек гидросъемника, что видимо связано со значительной разницей в теплопроводности стали и капролона и большая часть, выделяемой в процессе работы устройства, тепловой энергии идет именно в металлический вал и аккумулируется с противоположной течению водно-цементной смеси стороны, т.к. данная часть гидросъемника не охлаждается, проходящей внутри жидкостью, а конвекционный теплообмен с окружающим воздухом слишком незначителен и не может нивелировать поступление постоянно образующейся тепловой энергии, что и создает для «правого» уплотнительного эле-

мента крайне неблагоприятные условия эксплуатации.

Рассматривая влияние коэффициента теплопроводности стального вала, следует отметить, что с ростом теплопроводности происходит уменьшение значения температуры в рассматриваемых точках, что очевидно связано с режимом охлаждения гидросъемника водно-цементной смесью способствующей перераспределению тепла в сторону центрального отверстия. Вследствие низкой теплопроводности уплотнительного элемента тепловой поток в данном направлении будет меньше того, что переходит в стальной вал и затем либо переходит в рабочую жидкость, либо идет на увеличение температуры в «правой части» (рис. 3) устройства.

Особенно заметно различие степени влияния коэффициентов теплопроводности в экстраполированных данных. При увеличении теплопроводности вала до значения $35 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$ заметно явное снижение температуры (рис. 6), причем ее значение, что немаловажно, будет находиться в области рабочих температур уплотнительного элемента (до $+160^\circ\text{C}$ по ТУ 2224-003-39046337-2018, ТУ 2224-001-39046337-2018).

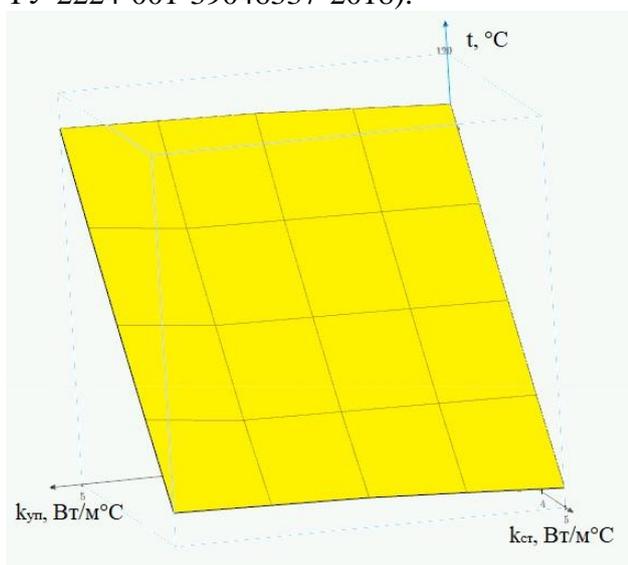


Рис. 6. График зависимости температуры от изменения коэффициентов теплопроводности вала и уплотнительного элемента в 1-й точке

Однако такая теплопроводность характерна для низкоуглеродистых и низколегированных сталей, применение которых для гидросъемника может быть не совсем обос-

нованным. Поскольку находящаяся во внутренней полости устройства рабочая жидкость находится под довольно высоким давлением (около $40 \dots 70 \text{ МПа}$, а, вероятно, и с возможностью увеличения давления до 100 МПа), то использование выше указанной группы материалов с невысоким пределом текучести для изготовления деталей этого конструктивного узла может быть сопряжено с риском возникновения недопустимых деформаций, чье появление просто исключительно по причине возникновения в таком случае аварийной ситуации, а значит необходимо будет уменьшить величину рабочего давления, что в свою очередь приводит к уменьшению диаметра, получаемых грунтобетонных свай, вследствие недостаточного уровня кинетической энергии струй подаваемого в грунт цементного раствора, увеличению соответственно материалов и трудозатрат и в целом падению эффективности производства строительных работ. Также обладая не высокой коррозионной стойкостью, применение низкоуглеродистых и низколегированных сталей здесь будет влиять на эксплуатационный ресурс вала в сторону его (ресурса) снижения, что так же не является положительным моментом. Опираясь на выше изложенное, можно сделать вывод о рациональном применении в качестве материала для металлических деталей гидросъемника прежде всего легированных сталей с достаточной коррозионной стойкостью ферритного класса, коэффициент теплопроводности которых порядка $25 \text{--} 28 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$ и обладающие достаточными прочностными характеристиками в сочетании с высокой обрабатываемостью.

5. Заключение

Получены методом конечных элементов в среде «Siemens Femap» значения температуры в зависимости от изменения коэффициентов теплопроводности контактирующих элементов гидросъемника, на основе которых построены графики соответствующей зависимости для ряда точек, расположенных в характерных областях конструкции. Полученные данные аппроксимированы степен-

ной регрессией и проведена экстраполяция, что в дальнейшем позволяет вычислить значения температуры в указанных областях, рассматриваемого сборочного узла и позволит подбирать материал для бурового вала гидросъемника исходя из оптимального соотношения коэффициента теплопроводности

вала, его коррозионной стойкостью, определяемых химическим составом стали и соответствующего коэффициента теплопроводности уплотнительного элемента.

Список литературы

1. Merlini D., Stocker D., Falanesca M., Schuerch R. The Ceneri Base Tunnel: Construction Experience with the Southern Portion of the Flat Railway Line Crossing the Swiss Alps // *Engineering*. 2018. Vol.4. P. 235. DOI: 10.1016/j.eng.2017.09.004
2. Toraldo C., Modoni G., Croce P. Reliable definition of the characteristic strength of jet grouted soils by Random Field Theory // *Procedia Engineering*. 2016. Vol.158. P. 416. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.465
3. Wang Z.-F., Shen Sh.-L., Modoni G. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: Theoretical model and application // *Computers and Geotechnics*. 2019. Vol. 111. P. 222. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012
4. 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: 10.1155/2020/8078527
5. Yuan Y., Shen S.L., Wang Z.F., Wu H.N. Automatic Pressure-Control Equipment for Horizontal Jet-grouting // *Autom. Constr.* 2016. Vol. 69. P. 11.
6. Шевелев А.М., Ульянов А.А., Борышнев А.М., Новиков В.И. Моделирование распределения теплового поля в элементах гидросъемника для струйной цементации грунтов // Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении» СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 236-239.
7. Гарипов М.В., Головин К.А. Разработка конструкции расширителя прокалывающей установки для закрепления неустойчивых горных пород // *Известия Туль-*

References

1. Merlini D., Stocker D., Falanesca M., Schuerch R. The Ceneri Base Tunnel: Construction Experience with the Southern Portion of the Flat Railway Line Crossing the Swiss Alps. *Engineering*, 2018, Vol.4, p. 235. DOI: 10.1016/j.eng.2017.09.004
2. Toraldo C., Modoni G., Croce P. Reliable definition of the characteristic strength of jet grouted soils by Random Field Theory. *Procedia Engineering*, 2016, Vol.158, p. 416. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.465
3. Wang Z.-F., Shen Sh.-L., Modoni G. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: Theoretical model and application. *Computers and Geotechnics*, 2019, Vol.111, p. 222. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012
4. 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, 8078527. DOI: 10.1155/2020/8078527
5. Yuan Y., Shen S.L., Wang Z.F., Wu H.N. Automatic Pressure-Control Equipment for Horizontal Jet-grouting. *Autom. Constr.*, 2016, Vol. 69, p. 11. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.05.025
6. Shevelev A.M., Ulyanov A.A., Borishnev A.M., Novikov V.I. Modelirovanie raspredeleniya teplovogo polya v elementah gydros'emnika dlya struinoi tsementatsii gruntov. *Innovacionnie idei v mashinostroenii. Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*, SPb, POLITECH-PRESS, 2022, pp. 236-239.
7. Golovin K.A. Development of the design of the extender piercing installation for fixing unstable rocks. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskii*

ского государственного университета. Технические науки. 2013. № 1. С. 326-329.

8. Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Моделирование теплового баланса в процессе эксплуатации элементов гидросъемника бурового става для струйной цементации грунтов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. № 3. С. 404. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-404-410

9. Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Щербачев А.П., Кузьмин О.В. Особенности расчета теплового баланса гидросъемника с учетом влияния на шероховатость поверхности электролитно-плазменного полирования // Металлообработка: научно-производственный журнал. 2020. № 4. С. 16. DOI: 10.25960/mo.2020.4.16

10. 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: 10.31857/S0235711922020109

† nauki, 2013, No. 1, pp. 326-329. (In Russian).

† 8. Novikov V.I., Pushkarev A.E., Manvelova N.E. The modeling of the heat balance during operation of the drill stem hydraulic elements for inject soil cement. *Nauchno-tekhnicheskii Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2020, No. 3. (In Russian).

† 9. Novikov V.I., Pushkarev A.E., Scherbakov A.P., Kuzmin O.V. The influence of changes the surface roughness by electrolytic plasma polishing to the heat balance of the jet-grouting hydraulic puller. *Metalloobrabotka*, 2020, No. 4(118), pp. 16-23. (In Russian).

† 10. 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.