

Научная статья
УДК 69.002.5
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-180-189>
EDN: USIPAL



РАЗРАБОТКА ТИПОРАЗМЕРНЫХ РЯДОВ ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ГИДРОСТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В.И. Новиков

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия
vitalynewage@gmail

АННОТАЦИЯ

Введение. Работа посвящена расчету типоразмерных рядов для проектирования передающих устройств высокого давления, используемых в различных гидроструйных технологиях, который позволит обеспечить проектирование данных устройств исходя из безразмерных показателей, описывающих взаимосвязи их геометрических и технологических параметров.

Материалы и методы. Методология включает в себя применение математических моделей и аналитических подходов для оценки влияния различных параметров на процессы теплообразования в оборудовании, а также и методов статистической обработки результатов.

Результаты. Проведенные исследования позволили построить гистограмму распределения температур и провести аппроксимацию данных с использованием кривой распределения значений температуры, а также сформировать параметрические ряды для безразмерных параметров в зависимости от различных факторов, таких как температура, давление, частота вращения и линейная скорость. Таким образом, обеспечена возможность получения параметрических рядов для линейных размеров из пяти диапазонов температур и семи типоразмеров в зависимости от давления и частоты вращения бурового вала.

Заключение. Полученные результаты обеспечивают более глубокое понимание взаимосвязей между частотой вращения, геометрическими характеристиками и температурными показателями за счет применения безразмерных показателей, что позволяет оптимизировать проектирование подобных устройств, учитывая условия эксплуатации и обеспечивая повышение их эффективности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидроструйные технологии, передающее устройство, уплотнительный элемент, параметрические ряды, типоразмерный ряд, оптимизация проектирования, параметризация, температура

БЛАГОДАРНОСТИ: статья публикуется по результатам исполнения гранта СПбГАСУ 2024 г.

Статья поступила в редакцию 14.03.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 22.04.2024.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Новиков В.И. Разработка типоразмерных рядов передающих устройств для гидроструйных технологий на основе безразмерных геометрических параметров // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2. С. 180-189. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-180-189>

© Новиков В.И., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-180-189>

EDN: USIPAL

STANDARD SERIES OF TRANSMITTING EQUIPMENT FOR HYDRA-JET TECHNOLOGY BASED ON DIMENSIONLESS GEOMETRIC PARAMETERS DEVELOPMENT

Vitalii I. Novikov

*St Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia
vitalynewage@gmail*

ABSTRACT

Introduction. The work is devoted to the calculation of series standards for the design of high-pressure transmission devices used in various hydra jet technologies, which will provide the design of these devices based on dimensionless indicators describing the relationship between their geometric and technological parameters.

Materials and methods. The methodology includes the use of mathematical models and analytical approaches to assess the influence of various parameters on heat generation processes in equipment, as well as methods for statistical processing of results.

Results. A histogram of temperature distribution was constructed and the data was approximated using the distribution curve of temperature values and parametric series were generated for dimensionless parameters depending on various factors such as temperature, pressure, rotational speed and linear speed. It is possible to obtain parametric series for linear dimensions from five temperature ranges and seven standard sizes depending on the pressure and rotation speed of the drill shaft.

Discussion and conclusions. The results obtained provide a better definition of the relationships between rotation speed, geometric characteristics and temperature parameters through the use of dimensionless indicators and it is possible to optimize the design of such devices taking into account operating conditions and ensuring increased efficiency.

KEYWORDS: *hydra-jet technologies, hydro-puller device, sealing, parametric series, standard series, design optimization, parameterization, temperature*

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

The article was submitted 14.03.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 22.04.2024.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Novikov V.I. Standard series of transmitting equipment for hydraset technology based on dimensionless geometric parameters development. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2024; 21 (2): 180-189. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-180-189>

© Novikov V.I., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Струйная цементация грунтов (СЦГ) представляет собой эффективный и технологичный метод укрепления и улучшения грунтового основания, широко применяемый в строительной отрасли. Этот инновационный процесс сочетает в себе использование цементного раствора и высокого давления, создавая мощное соединение между частицами грунта и цементом [1, 2, 3]. В результате струйной цементации достигается не только повышение прочности грунтового слоя, но и улучшение его инженерных характеристик, что играет ведущую роль в обеспечении устойчивости строительных объектов. Данная технология становится неотъемлемой частью современных решений при строительстве различных объектов, обеспечивая их надежность и долговечность [4, 5, 6, 7, 8]. Однако, несмотря на высокую эффективность СЦГ, проектирование устройств, работающих по данной технологии, сопряжено с рядом значительных технических и инженерных сложностей в связи с использованием высокого давления. Одной из основных проблем является необходимость обеспечения надежной работы оборудования при подаче цементного раствора под значительным давлением в грунтовые слои. В особенности такая ситуация характерна для передающих устройств (гидросъемников) [9].

Данные конструктивные узлы обладают несложной принципиальной конструктивной схемой, однако данная довольно простая конструкция при реализации вынуждает решать целый ряд сложностей, связанных с решением одной проблемы, но параллельно усугублением другой.

Основная проблема вытекает из назначения устройства, задачей которого является соединить неподвижную гидромагистраль, по которой происходит подвод рабочей жидкости с буровым ставом, вращающимся с заданной технологическим режимом скоростью. Соответственно, возникает необходимость обеспечения герметичности конструктивного узла, что предполагает использование неподвижных уплотнительных элементов, находящихся в контакте с вращающейся поверхностью вала. Результат этого контакта – механиче-

ское трение между вышеуказанными элементами конструкции и, очевидно, процесс тепловыделения, уровень которого может быть довольно значительным и при некоторых условиях достигать нескольких киловатт [10]. Величина выделяющейся тепловой энергии в основном зависит от двух параметров – это скорость вращения вала и площадь контактных поверхностей, причем первый из них (параметров) задан в качестве технологического и его изменение влечет за собой нарушение технологического процесса, а значит, менять его значение как минимум не рекомендуется, а в оптимальном варианте не представляется возможным. Таким образом, применяют в качестве конструктивного решения прямое уменьшение площади поверхности трения, т.е. уменьшают наружный диаметр вала и, соответственно, внутренний диаметр уплотнительных элементов, что влечет уменьшение размеров самого передающего устройства. Однако данное решение приводит к тому, что уменьшается также диаметра внутреннего отверстия, по которому рабочая жидкость поступает к гидроинструменту, но согласно закону Бернулли, уменьшение сечения приводит к росту скорости движения рабочей жидкости и падению рабочего давления, что сказывается на гидравлической мощности, реализуемой гидроструйной технологии.

Соответственно, конструирование выше описанных устройств сегодня происходит не унифицировано, а предполагает сугубо индивидуальной подход, опирающийся на личные знания и опыт инженера-конструктора, выбирающего тот или иной вариант в зависимости от конкретных условий применения, влияющих на формирование теплового состояния, проектируемого гидросъемника [11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе данного исследования были выполнены расчеты распределения температурного поля в гидросъемнике, характеризующего тепловое состояние рассматриваемого устройства, основываясь на проведенных вычислительных экспериментах с использованием метода конечных элементов в современном САПР^{1,2}. Включен статистический и графиче-

¹ Моделирование распределения теплового поля в элементах гидросъемника для струйной цементации грунтов / Шевелев А.М. [и др.] // Инновационные идеи в машиностроении: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / ПОЛИТЕХ-ПРЕСС / Санкт-Петербург, 2022. С. 236–239.

² Возможность влияния на тепловой баланс устройств для струйной цементации грунтов управлением геометрическими параметрами бурового вала / Шевелев А.М. [и др.] // 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.

ский анализ результатов, в том числе построение гистограммы распределения температур и аппроксимация кривой распределения. Создана математическая модель распределения температур с использованием современных САПР программ и подтверждена ее адекватность. Применен метод интегрирования функции распределения для дополнительной детализации процесса и выделения предпочтительных значений температуры оборудования. В исследовании учтены литературные данные и проведен анализ параметров оборудования с применением методов сравнительного анализа. Таким образом, с использованием современных технологий и разнообразных методов обеспечено наиболее полноценное исследование параметров процесса работы гидросъемника как передающего устройства высокого давления.

Расчетная часть моделирования проведена в программном комплексе *Ansys*, который может учитывать разнообразные конструктивные нелинейности и позволяет решить общий случай теплопередачи. Основным для данной модели выбрана конструкция передающего устройства для струйной цементации грунтов, состоящая из бурового вала (вращающийся элемент) $\varnothing 100$ мм с глухим отверстием $\varnothing 45$ мм для подачи водно-цементной смеси во внутреннюю полость и двумя отверстиями диаметром по 20 мм для подвода смеси от наружной гидромагистрали, а также неподвижных составляющих: двух пакетов уплотнительных элементов, корпуса и крышек с зажимающими

болтами. Конечно-элементная сетка представляет собой совокупность элементов с максимальной длиной стороны 1,5 мм, общее количество которых порядка $7 \cdot 10^6$ узлов и порядка $4,5 \cdot 10^6$ элементов с максимальными коэффициентами сгущения на поверхности и разрежения соответственно 1 и 1,5 (рисунок 1).

Материалы, применяемые в моделях, соответствуют по своим физико-механическим характеристикам ниже следующим компонентам – коррозионностойкой стали 40X13, полиамиду «капролон» ПА-6 (уплотнительные элементы), значения коэффициентов теплопроводности которых – 25 Вт/м °С и 0,25 Вт/м °С соответственно; коэффициент трения – 0,1. На поверхностях трения задавалась величина тепловой мощности в Вт согласно имеющейся методике расчета [12] при нормальных условиях и температуре рабочей жидкости (водно-цементной смеси) 20 °С. Рассматривалась статическая тепловая задача получения распределения теплового поля с учетом теплопроводности материалов.

Проанализированы диапазоны изменений технологических параметров СЦГ, таких как частота вращения буровой колонны, давление водно-цементной смеси, линейная скорость бурового вала и безразмерные геометрические параметры рассматриваемого устройства – приведенный диаметр бурового вала и приведенная длина уплотнительного элемента:

1) для давления водоцементной суспензии (P): дискретный ряд значений – 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 МПа;

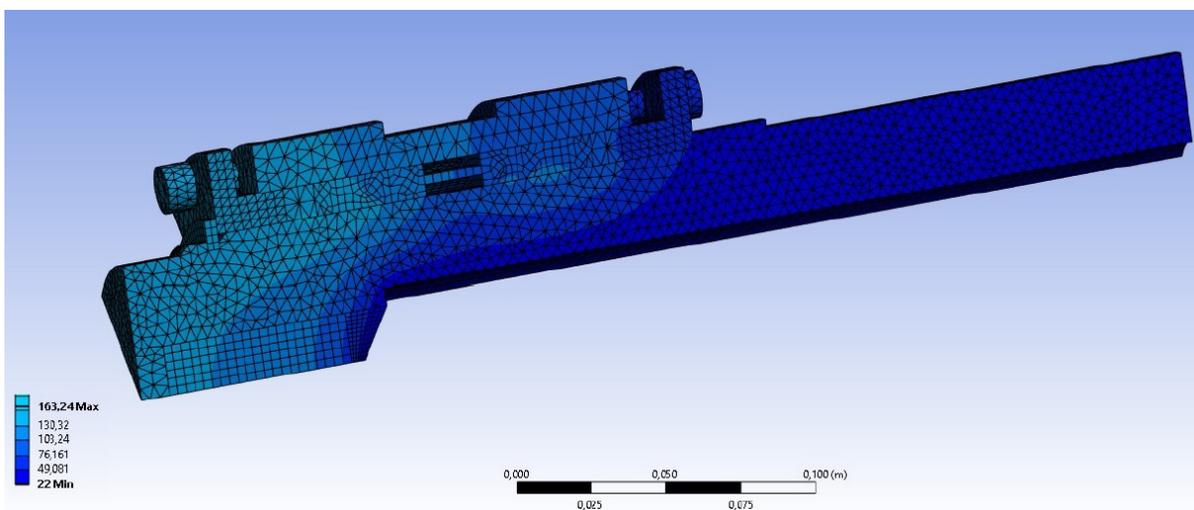


Рисунок 1 – Вид конечно-элементной сетки и распределение теплового поля в гидросъемнике (в *Ansys*)
Источник: составлено автором.

Figure 1 – The view of the finite element mesh and distribution the hydro-puller device's thermal field (by «Ansys»)
Source: compiled by the author.

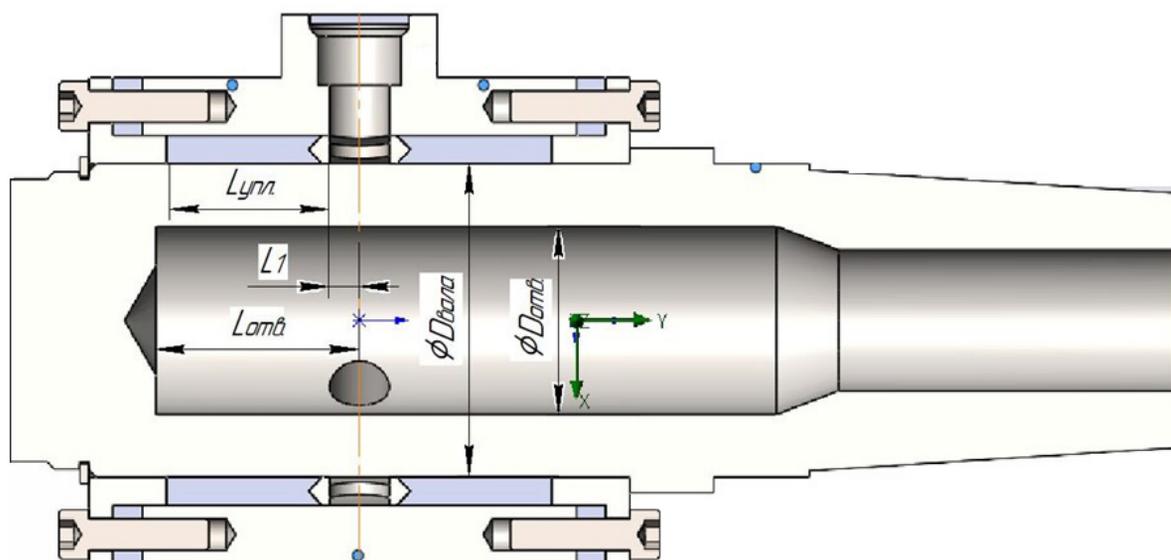


Рисунок 2 – Продольное сечение гидросъемника с указанием геометрических параметров
Источник: составлено автором.

Figure 2 – The hydro-puller device's longitudinal cross-section with an indication of geometric parameters
Source: compiled by the author.

2) для частоты вращения буровой колонны (n): дискретный ряд значений – 15, 25, 35, 50, 65, 80, 95 об/мин (0,25, 0,42, 0,58, 0,83, 1,33, 1,58 c^{-1});

3) для линейной скорости вала (V): дискретный ряд значений – 0,0052, 0,0848, 0,2564, 0,5202, 0,8761, 1,3240, 1,8641 м/с;

4) для приведенного диаметра бурового вала ($D_{прив}$): дискретный ряд значений – 0,45, 0,5, 0,55, 0,6, 0,65, 0,75;

5) для приведенной длины уплотнительного элемента ($L_{прив}$): дискретный ряд значений – 0,02, 0,3, 0,7, 1, 1,15.

Общее количество проведенных вычислений при переборе каждого сочетания выбранных параметров составило 12005 шт. Рассчитанные значения температурного поля для каждой комбинации составили интервал от 35,94 до 393,4 °С. Результаты анализа выявили необходимость статистического исследования, включающего в себя построение гистограммы распределения температур и аппроксимацию данных с использованием кривой распределения значений температуры, а параметрические ряды для безразмерных параметров сформированы в зависимости от различных факторов, таких как температура и давление. Полученные в ходе проведенных вычислительных экспериментов распределения температурного поля (на рисунке 1 показана часть 3D-модели в продольном сечении

гидросъемника при $P=40$ МПа, $n=65$ об/мин, $V=0,8761$ м/с, $D_{прив}=0,5$, $L_{прив}=0,3$, $D_{вала}=100$ мм) и соответствующие ему (полю) значения температур позволили выявить зависимость значения температуры от технологических параметров (давление рабочей жидкости и частота вращения вала) и геометрических параметров устройства (наружный диаметр вала, диаметр внутреннего отверстия, длина пакета уплотнительных элементов, глубина внутреннего отверстия).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Поскольку предполагается использовать передающие устройства высокого давления в комплекте оборудования для реализации гидроструйной технологии, то величина температуры будет выступать в качестве главного параметра, а в качестве основных параметров для выбора устройства целесообразно принять давление рабочей жидкости и частоту вращения вала. Совместное сочетание основных параметров устройства и параметрического ряда образует ряд, который принято называть типоразмерным. Эффективность процесса СЦГ в основном определяется такой характеристикой, как давление рабочей жидкости, именно по данной причине следует при разработке типоразмерного ряда передающих устройств целесообразно задавать эту величину, также следует задаться длиной уплот-

нительного элемента и глубиной отверстия, линейную скорость и частоту вращения вала либо рассчитать исходя из взаимосвязи с величиной давления, а диаметр сечения вала и диаметр внутреннего отверстия рассчитывать с учетом конструктивных особенностей объекта. С целью сокращения количества параметров введены две безразмерные величины, характеризующие площадь контакта поверхностей, по которым происходит трение – это приведенный диаметр, равный отношению диаметра внутреннего отверстия вала к его наружному диаметру и приведенная длина, определяемая как отношение глубины отверстия к длине одного пакета уплотнительных элементов (рисунок 2).

Для отражения взаимосвязи параметров, описывающих процесс СЦГ и температуры, в результате выполненных исследований получена соответствующая зависимость и составлена система уравнений:

$$\begin{cases} T = 56 \cdot P^{0,6} \cdot n^{0,25} \cdot D_{отв}^{-0,01} \cdot L_{прив}^{-0,12} \\ D_{прив} = D_{отв} / D_{вала} \\ L_{прив} = L_{отв} / L_{упл.} \\ V = \pi \cdot D_{вала} \cdot n \end{cases}$$

где T – максимальная температура устройства, °С; P – давление рабочей жидкости, МПа; n – частота вращения вала, с⁻¹; $D_{прив}$ – приведенный диаметр; $D_{отв}$ – диаметр внутреннего отверстия вала, м; $D_{вала}$ – наружный диаметр вала, м; $L_{прив}$ – приведенная длина; $L_{отв}$ – глубина внутреннего отверстия, м; $L_{упл.}$ – длина одного пакета уплотнительных элементов, м; V – линейная скорость вала, м/с.

Вычисления значений температур, характеризующих тепловое состояние гидросъем-

ника, было выполнено методом перебора³ с использованием ПЭВМ для определенных диапазонов изменения основных параметров – давление водно-цементной смеси (P); частота вращения буровой колонны (n); линейная скорость вала (V); приведенный диаметр вала ($D_{прив}$); приведенная длина уплотнительного элемента ($L_{прив}$).

Проведенный анализ полученных результатов в количестве 12005 вычислений, которые являются выборочным решением для системы, описывающей тепловое состояние гидросъемника и характеризующей его тепловой баланс, выявил необходимость в статистической обработке полученных в исследовании данных. Для того чтобы получить кривую распределения исходя из данного диапазона варьирования следует полученную область исследования разбить на классы с применением правила Штюргеса⁴:

$$k \approx 1+3,32lg(N),$$

где k – количество классов; N – количество вычислений (опытов).

Таким образом, для имеющегося $N = 12006$ получаем

$$k = 1+3,32lg12005 = 14,5.$$

Рассчитаем шаг класса t' для размаха варьирования от 35,94 до 393,4 °С, который составит

$$t' = (393,4-35,94)/14,5 \approx 25.$$

Затем исследуемая область разбивается на полученное число классов, для каждого из которых определяется количество выпадений соответствующих расчетных значений температуры (таблица 1).

Таблица 1

Количество (N) встречающихся значений температуры (T) в заданных интервалах
Источник: составлено автором.

Table 1

The number (N) of occurring temperature values (T) in the intervals
Source: compiled by the author.

$T, ^\circ\text{C}$	30–60	60–85	85–110	110–135	135–160	160–185	185–210	210–235	235–260	260–285	285–310	310–335	335–360	360–385	385–410
N , шт.	1111	1079	777	957	1463	1260	1529	937	964	600	522	300	265	198	43

³ Гребенникова И.В. Методы оптимизации: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2017. 148 с.

⁴ Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 243 с

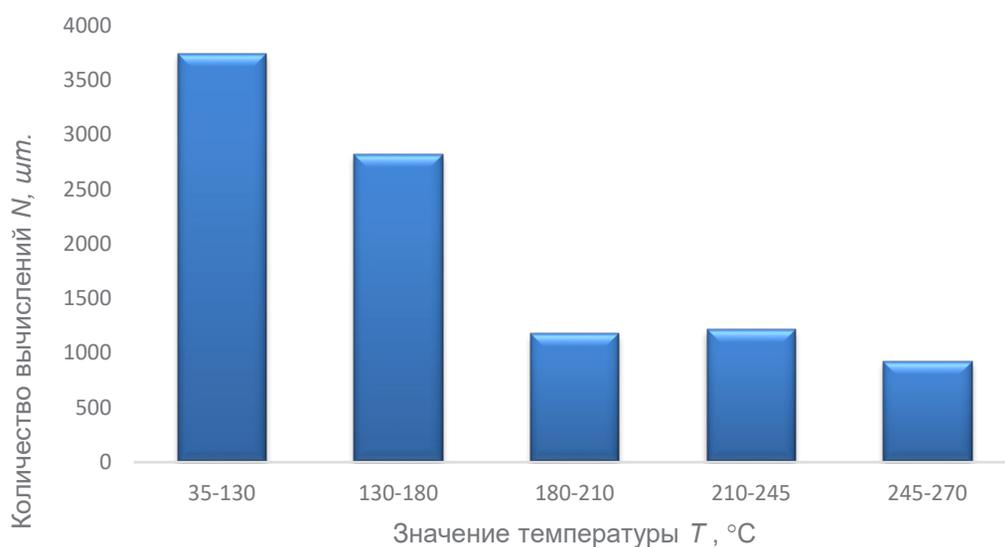


Рисунок 3 – Гистограмма распределения разделенных температур оборудования
Источник: составлено автором.

Figure 3 – The histogram of the separated temperatures equipment distribution.
Source: compiled by the author.

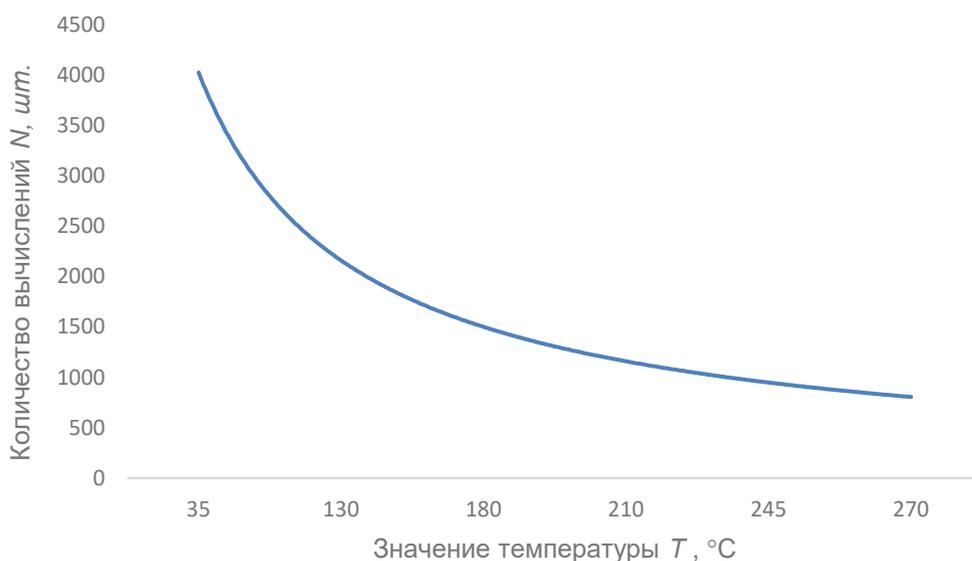


Рисунок 4 – Кривая распределения значений температуры гидросъемников для СЦГ
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Typical layout of the jet-grouping's hydro-puller devices
Source: compiled by the author.

Для создания ряда предпочтительных значений температуры производится разбиение на равные составляющие, что будет соответствовать применению устройства каждого интервала значений с равновероятной частотой использования, соответствующих определённому тепловому балансу для гидросъемника, однако целесообразно учитывать следующее факторы:

– значения температуры оборудования выше 270 °C не принимаются во внимание при построении типа размерного ряда, поскольку не существует материала для уплотнительного элемента, который был бы способен обеспечить нормальную работу устройства при температуре выше 270 °C, а также оборудование, способное работать в отбрасываемом интервале температур, встречается крайне редко;

– следует принять во внимание диапазоны эксплуатационной температуры, характеризующие наиболее распространенный материал уплотнительного элемента – «Капролон» (ПА-6): рабочие температуры – от -60 до +120 °С, температуры кратковременной эксплуатации – от +100 до +170 °С, температура размягчения – от +190 до +200 °С, температура плавления – +215 °С;

– возможность применения иных материалов, отличных от рассматриваемого в данном исследовании полиамида ПА-6.

По полученным данным, с учетом вышеприведенных факторов, построена гистограмма распределения, представленная на рисунке 3. Соединяя вершины середины столбиков прямыми отрезками, проводя таким образом кусочно-линейную аппроксимацию искомой функции, получаем ломаную линию, являющуюся полигоном распределения.

Аппроксимируя полигон распределения степенной зависимостью, получена кривая распределения значений температуры для всей области применения гидросъемников для СЦГ (рисунок 4).

Уравнение данной кривой, вычисленное с помощью прикладной программы, имеет вид

$$N = 3935 \cdot T^{-0.86}$$

Значение индекса корреляции составило $R^2 = 0,93$, что подтверждает адекватность аппроксимации данных предложенной зависимостью. Площадь фигуры, ограниченная снизу осью T , сверху кривой распределения, слева прямой с координатой $T=35$ °С и справа прямой с координатой $T=270$ °С, представляет собой область передающих устройств высокого давления для гидроструйных технологий. В качестве начального интервала задается интервал значений температуры от 35 до 130 °С. Площадь данного участка вычисляется как интеграл от функции распределения с пределами интегрирования от 35 до 130. С учетом вышеизложенного получен окончательный ряд значений температуры T , °С: 35; 130; 180; 210; 245. Каждому значению температуры из ряда будет соответствовать своя пара значений для приведенных диаметра и длины исходя из заданного значения давления рабочей жидкости, т.е. параметрический ряд передающих устройств будет образован из семи исполнений (по значению давления рабочей жидкости) и пяти типоразмеров в зависимости от значения температуры (таблицы 2, 3).

Таблица 2

Таблица типоразмеров и исполнений вариантов приведенной длины ($L_{\text{прив}}$) для гидросъемника в зависимости от номинального давления (P) водно-цементной смеси
Источник: составлено автором.

Table 2

The table of standard sizes and versions of reduced length options (L_{priv}) for a hydraulic puller depending on the nominal pressure (P) of the water-cement mortar
Source: compiled by the author.

Типоразмер	Температура T , °С	Гидросъемник						
		Исполнение						
		1	2	3	4	5	6	7
		Давление номинальное P , МПа						
		40	50	60	70	80	90	100
1	35	0,3	0,3	0,7	1	1	1,15	1,15
2	130	0,3	0,7	0,7	0,7	1	1	1,15
3	180	0,02	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7	1
4	210	0,02	0,3	0,3	0,7	1	1,15	0,7
5	245	0,02	0,3	0,7	0,7	0,7	1	1,15

Таблица 3

Таблица типоразмеров и исполнений вариантов приведенного диаметра ($D_{\text{прив}}$) для гидросъемника в зависимости от номинального давления (P) водно-цементной смеси
Источник: составлено автором.

Table 3

The table of standard series and designs of reduced diameter options (D_{priv}) for a hydraulic puller depending on the nominal pressure (P) of the water-cement mortar
Source: compiled by the author.

Типоразмер	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Гидросъемник						
		Исполнение						
		1	2	3	4	5	6	7
		Давление номинальное P , МПа						
		40	50	60	70	80	90	100
		$D_{\text{прив}}$						
1	35	0,45	0,5	0,5	0,6	0,6	0,75	0,75
2	130	0,75	0,55	0,75	0,6	0,65	0,7	0,75
3	180	0,5	0,7	0,75	0,45	0,65	0,75	0,6
4	210	0,45	0,5	0,55	0,75	0,75	0,75	0,6
5	245	0,5	0,55	0,6	0,55	0,6	0,55	0,55

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных расчетов и полученных результатов можно вывести обобщенный вывод о том, что эффективная эксплуатация гидросъемника тесно связана с рациональными температурными характеристиками передающего устройства. Основываясь на этих данных, были проведены вычислительные процедуры для выявления таких параметров в отношении размеров устройства и в результате выполненных исследований получены пять диапазонов температур и семь типоразмеров гидросъемника по безразмерным параметрам приведенного диаметра и приведенной длины уплотнительного элемента. Таким образом, разработан типоразмерный ряд для передающих устройств высокого давления, применяемых в гидроструйных технологиях при обеспечении максимально эффективной работы данных устройств при минимальной температуре с учетом условий эксплуатации. Полученный в результате расчетов ряд предпочтительных сочетаний основных геометрических параметров (соответствующие типоразмерный и параметрический ряды) может быть использован для обоснованного задания выходных параметров при проектировании оборудования для струйной цементации грунтов и горных пород при комплектовании технологических комплексов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Borkowski P.J., Abramowski T., Szada-Borzyszkowska M., Szada-Borzyszkowski W. Comminution of Polymetallic Nodules with a High-Pressure Water Jet. *Materials*. 2022; 15(22): 8228. <https://doi.org/10.3390/ma15228228>
- Barabas S., Florescu A. Reduction of Cracks in Marble Appeared at Hydro-Abrasive Jet Cutting Using Taguchi Method. *Materials*. 2022; 15(2): 486. <https://doi.org/10.3390/ma15020486>
- 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 <https://doi.org/10.1177/03611981231168842>
- Zhetessova G., Nikonova T., Gierz Ł., Zhunuspekov D., Yurchenko V., Zharkevich O. Preparation of the Surface of Long-Dimensional Rods of Hydro-Cylinders for Thermal Spraying Using an Abrasive Jet. *Coatings*. 2022; 12(10): 1514. <https://doi.org/10.3390/coatings12101514>
- Borkowski P.J., Szada-Borzyszkowski W. Micronization of Hard Coal with the Use of a High-Pressure Water Jet. *Energies*. 2021; 14(16): 4745. <https://doi.org/10.3390/en14164745>
- Song J., Zhang H., Yu S., Su X. Application of integrated drilling and stamping technology in gas extraction through layer drilling. *Energy Exploration & Exploitation*. 2022; 40(4): 1113–1130. <https://doi.org/10.1177/01445987221078053>
- Wang Z.-F., Shen S.-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 V. 111, P. 222 <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.03.012>

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*. Volume 2020. Article ID 8078527. 16 p. <https://doi.org/10.1155/2020/8078527>

9. Гарипов М.В., Головин К.А. Разработка конструкции расширителя прокальвающей установки для закрепления неустойчивых горных пород // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2013. № 1. С. 326–329.

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. <https://doi.org/10.3103/s1052618822020108>.

11. Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Мавелова 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. 404–410 <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-03-404-410>.

12. 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.

REFERENCES

1. Borkowski P.J., Abramowski T, Szada-Borzyszkowska M, Szada-Borzyszkowski W. Comminution of Polymetallic Nodules with a High-Pressure Water Jet. *Materials*. 2022; 15(22):8228. <https://doi.org/10.3390/ma15228228>

2. Barabas S., Florescu A. Reduction of Cracks in Marble Appeared at Hydro-Abrasive Jet Cutting Using Taguchi Method. *Materials*. 2022; 15(2):486. <https://doi.org/10.3390/ma15020486>

3. 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 <https://doi.org/10.1177/03611981231168842>

4. Zhetessova G., Nikonova T., Gierz Ł., Zhunuspekov D., Yurchenko V., Zharkevich O. Preparation of the Surface of Long-Dimensional Rods of Hydro-Cylinders for Thermal Spraying Using an Abrasive Jet. *Coatings*. 2022; 12(10):1514. <https://doi.org/10.3390/coatings12101514>

5. Borkowski P.J., Szada-Borzyszkowski W. Micronization of Hard Coal with the Use of a High-Pressure Water Jet. *Energies*. 2021; 14(16):4745. <https://doi.org/10.3390/en14164745>

6. Song J., Zhang H, Yu S., Su X. Application of integrated drilling and stamping technology in gas extraction through layer drilling. *Energy Exploration & Exploitation*. 2022; 40(4): 1113–1130. <https://doi.org/10.1177/01445987221078053>

7. Wang Z.-F., Shen S.-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 V. 111, P. 222 <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.03.012>

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*. V. 2020. Article ID 8078527. 16 p. <https://doi.org/10.1155/2020/8078527>

9. Golovin K.A. Development of the design of the extender piercing installation for fixing unstable rocks. *Izvestiya Tula State University" (Izvestiya TulGU)*. 2013; 1: 326–329. (In Russ.)

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, № 51(4), pp. 329–335. <https://doi.org/10.3103/s1052618822020108>.

11. Novikov V.I., Pushkarev A.E., Manvelova N.E. Modeling of the heat balance of elements of a drill hydraulic remover for inject cementation of soils during operation. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020; 3: 404–410. (In Russ.) DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-404-410

12. Golovin K.A., Malikov A.A., Pushkarev A.E. Thermal mode of operation of high-pressure hydraulic puller at hydro jet grouting installations. *Izvestiya Tula State University" (Izvestiya TulGU)*. 2015; 4: 46–52. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Новиков Виталий Иванович – канд. техн. наук, доц. кафедры судебных экспертиз Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4472-8218>, **Researcher ID:** W-1648-2019, **Scopus Author ID:** 57210646203, **SPIN-код:** 7590-7891, e-mail: vitalynewage@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vitaly I. Novikov. Cand. Sci., Associate Professor, Department of Forensics, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Krasnoarmeiskaya Str., St Petersburg, 190005) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4472-8218>, **Researcher ID:** W-1648-2019, **Scopus Author ID:** 57210646203, **SPIN-код:** 7590-7891, e-mail: vitalynewage@gmail.com