

Научная статья

УДК 69.002.5

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-528-539>

EDN: BBTCMX



Check for updates

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ГИДРОСТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.И. Новиков ✉, **О.В. Кузьмин***Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия**✉ ответственный автор
vitalynewage@gmail*

АННОТАЦИЯ

Введение. Гидроструйные технологии представляют собой инновационный подход к использованию воды под высоким давлением для различных целей. Эта технология нашла широкое применение в различных отраслях, включая строительство, промышленность, сельское хозяйство и очистку поверхностей. Основная идея гидроструйных систем заключается в использовании воды как мощного инструмента для разрушения, очистки и резки различных материалов. Статья посвящена особенностям и основным моментам, присущим процессу разработки передающих устройств высокого давления для гидроструйных технологий.

Материалы и методы. Проанализирована структура и классификация методов, реализующих гидроструйные технологии, включая общую структуру, и рассмотрены составляющие элементы выбранной классификационной схемы. Выделены обобщающие элементы и описана характерная компоновочная схема, реализуемая во всех технологических способах, относящихся к гидроструйным методам, рассмотрены конструктивные элементы, являющиеся основными составными частями и агрегатами, применяемыми в данных технологиях.

Результаты. Разработана схема движения энергетического потока по основным узлам традиционной компоновочной схемы агрегатов для гидроструйных технологий. Оценены формирующиеся в процессе эксплуатации энергетические потери, определен элемент гидроструйной установки с наибольшей величиной потерь, проанализированы особенности его функционирования и эксплуатации. Приводятся методики конструирования с учетом выявленных проблем и особенностей для передающих устройств высокого давления.

Заключение. Наиболее эффективная эксплуатация передающих устройств сверхвысокого давления для гидроструйных технологий возможна только с учетом их теплового состояния, характеризуемого описанием в них теплового баланса, который может быть обеспечен только за счет разработки ряда методик, предлагаемых к применению для проектирования устройств подобного типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидроструйные технологии, компоновочная схема, насос высокого давления, гидроинструмент, передающее устройство, гидромагистраль, уплотнительный элемент, тепловой баланс, конструирование, производительность, температура

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

Статья поступила в редакцию 14.04.2024; одобрена после рецензирования 21.06.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Новиков В.И., Кузьмин О.В. Особенности проектирования передающих устройств высокого давления для гидроструйных технологий // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 528-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-528-539>

© Новиков В.И., Кузьмин О.В., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-528-539>
EDN: BBTCTX

DESIGN FEATURES OF HIGH-PRESSURE TRANSMISSION DEVICES FOR HYDRO-JET TECHNOLOGY

Vitalii I. Novikov ✉, Oleg V. Kuzmin

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia
✉ corresponding author
vitalynewage@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Hydro-jet technology is an innovative approach to using high pressure water for a variety of purposes. The technology has found a wide application in various industries, including construction, industry, agriculture and surface cleaning. The basic idea of water jetting systems is to use water as a powerful tool to destroy, clean and cut various materials. The paper discusses the constructing of the high-pressure hydro-puller device for hydro-jet technologies.

Materials and methods. An analysis of the methods by hydro-jet technologies classification was made. The general structure and the constituent elements of this scheme is shown. Generalizing elements are identified and a characteristic layout diagram for use in all technological methods of hydro-jet methods is described, and the structural elements that are the main components and units of these technologies are described.

Results. The scheme of energy flow on the main nodes of the traditional layout scheme of units for hydro-jet technologies is developed. The energy losses formed in the process of operation are estimated, the element of the hydrojet plant with the largest losses is determined, the peculiarities of its functioning and operation are analysed. The design methodologies, taking into account the identified problems and features, for high-pressure transmitting devices are given.

Discussion and conclusions. The most efficient operation of ultra-high pressure transmitting devices for hydro-jet technologies is possible only taking into account their thermal state, characterized by a description of their thermal balance, which can only be ensured through the development of a number of techniques proposed for use in the design of such devices.

KEYWORDS: hydro-jet technologies, layout diagram, high-pressure pump, hydraulic tools, hydro-jet device, hydraulic main, sealing, heat balance, design, productivity, temperature.

ACKNOWLEDGEMENTS. The article is published based on the results by the implementation of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering grant in 2024.

The article was submitted 14.04.2024; approved after reviewing 21.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Novikov V.I., Kuzmin O.V. Design features of a high-pressure transmission devices for hydro-jet technologies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 528-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-528-539>

© Novikov V.I., Kuzmin O.V., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих отраслях промышленности: машиностроении, горнодобывающей, горнообрабатывающей, строительстве и т.д. реализуются технологии гидроструйной обработки материалов с использованием высоконапорного оборудования, принцип действия которых основан на использовании энергии струй рабочей жидкости, подающихся под давлением с различным наполнением (добавками). В качестве обобщающего обозначения для подобных технологий принято использовать понятие «гидроструйные технологии» (ГСТ)^{1,2}. Существующие гидроструйные технологии благодаря проведенным теоретическим и экспериментальным исследованиям имеют в своей основе отработанную методику их практической реализации, что позволяет непрерывно расширять область применения, а также повысить эффективность технологического процесса. Это достигается благодаря научно-техническому прогрессу, а также увеличению числа задач, которые возможно решить с помощью гидроструйных технологий вследствие их особенностей и преимуществ относительно других возможных методов решения рассматриваемой технической проблемы. Главным достоинством является минимально возможное термическое воздействие (а зачастую и отсутствие такового) при контакте с обрабатываемым материалом, что обуславливает отсутствие термических напряжений в горючих или взрывоопасных материалах, параллельно отмечается минимальное количество микрочастиц (или опять же их отсутствие, т.е. технологии отличаются высокой степенью экологичности) при работе технологического гидроструйного оборудования, которое характеризуется простотой и надежностью, а также довольно небольшой массой применяемых оснастки и приспособлений. Очевидно, что каждой отрасли присущи свои конкретные схемы ГСТ, например, для строительной, машиностроения или горнодобывающей отраслей применяют водяную струю в сочетании с добавками – абразивных или цементных частиц, а для воздействия на металлы и сплавы, особенно тугоплавкие, высокопрочные и т.п. или композиционные и керамические материалы возможно применение

ГСТ с криогенными, струями с частицами льда или струями сжиженных газов.

В целом область технологий ГСТ значительно исследована, включая не только отдельные виды, но и многообразные сочетания, что дает возможность определять эффективность использования, таких узлов гидроструйной установки как гидроинструмент, по имеющимся зависимостям^{1,2}. В основе любой ГСТ лежит энергия высоконапорной струи рабочей жидкости, т.е. работа, создаваемая мультипликатором или плунжером, как первичными исполнительными органами технологического оборудования, трансформирующаяся в кинетическую энергию путем прохождения через струеформирующее устройство малого диаметра за счет приложения давления (причем для каждого ГСТ применяется разная величина давления рабочей жидкости). Таким образом, осуществляется сжатие воды (или иного рабочего тела) до 400 МПа с перемещением через сопло $\varnothing 0,10\div 0,25$ мм, обеспечивая высокую скорость компактной струи порядка $800\div 900$ м/с с величиной удельной кинетической энергии >100 МДж/кг. Взаимодействие материала с энергией такого порядка приводит к появлению в нем напряжений, которые являются недопустимыми с точки зрения значения уровня прочности, приводя к его разрушению. Достичь такого эффекта можно используя непосредственно работу самих струй либо сочетая с иным воздействием (как правило, механическим), тем самым превращая в зоне обработки кинетическую энергию высокоскоростной струи в механическую работу. Такое свойство ГСТ как универсальность позволяет формировать научно-техническую базу для новых направлений реализации: активация гидротехнологических сред, гидроструйная диагностика изделий, гидроструйная технология получения микро- и наносuspensions и на сегодняшний день более 1500 систем ГСТ применяются в около 30 стран мира [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Целью данного исследования является обеспечение эффективной эксплуатации устройств для гидроструйных технологий за счет оценки формирующихся в процессе работы энергетических потерь и выявления ряда методик конструирования с учетом выявленных проблем и особенностей передающих устройств высокого давления.

¹ Бреннер В.А., Жабин А.Б., Щеголевский М.М. Совершенствование гидроструйных технологий в горном производстве. М.: Горная книга, 2010. 337 с.

² Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарев А.Е. Гидроабразивное резание горных пород. М.: МГГУ, 2003. 279 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривая всё многообразие схем и сочетаний методов ГСТ, в первую очередь можно выделить ряд обобщающих направлений, объединенных общим функциональным назначением, так укрупненно по цели применения выделяются методы разрушения, очистки и закрепления неустойчивых грунтов. Каждую из приведенных групп можно разбить на подгруппы по способу реализации гидроструйной технологии.

Методы очистки различаются применяемым давлением воды, которой производится непосредственно удаление загрязняющих веществ с разных поверхностей (корпуса судов, фасады зданий, различного рода оборудования и т.д.). Очистка обеспечивается за счет высокой скорости выпускаемой струи, обладающей соответствующим уровнем кинетической энергии.

К основным достоинствам относятся высокая степень очистки, высокая производительность, универсальность в части очищаемых типов материалов, применение в труднодоступных местах, пожаро- и взрывобезопасность, экологичность. По международной классификации, гидроструйная очистка подразделяется на очистку низкого и высокого давления, гидроструйную обработку и ультразвукового давления $>200 \text{ МПа}^3$.

В результате воздействия струйной цементации (СЦГ) на грунт, что является основным назначением данной технологии, в нем образуются колонны цилиндрической формы диаметром 600–2000 мм [7, 8, 9]. Главным достоинством технологии является возможность работы в ограниченном пространстве с высотой от 2000 мм и шириной от 1500 мм, отсутствие силового влияния на фундаменты близлежащих зданий, проработанность технологического процесса, что позволяет на ранних этапах проектирования рассчитывать прочностные и геометрические характеристики проектируемого сооружения.

Наиболее многочисленной является группа методов ГСТ, используемых как инструмент формообразования материалов, включая и их непосредственное разрушение. В основе методов, объединяемых в группу «разрушения»,

лежит физический процесс эрозии, при котором происходит разрушение, носящее хрупкий характер, т.к. подавляющая часть материалов, подвергаемая такой обработке, является хрупкими, но точно также можно воздействовать и на пластичные материалы, например, различные металлы и сплавы, которые в большинстве своем обладают именно пластическими свойствами. Воздействие струи может быть (аналогично зависит от свойств обрабатываемого материала) как абразивным (в качестве наполнителя применяют, как правило, гранитный песок) и при обработке твердых грунтов именно оно получило широкое распространение, т.к. позволяет воздействовать на материалы практически с любыми прочностными показателями, так и безабразивный режим для разрушения относительно мягких материалов.

Гидромеханический способ разрушения включает в себя комбинированное воздействие, причем здесь гидросоставляющая играет вспомогательную роль, задача которой состоит в минимизации усилий, возникающих в механическом инструменте (резцового или шарошечного) путем обеспечения разупрочнения обрабатываемого материала, отсюда и основная область применения данной технологии – наиболее прочные грунты или горные породы⁴ [8].

Цель применения гидрабразивного фрезирования состоит не в разрушении непосредственно объекта воздействия, а в его формообразовании, за счет удаления (разрушения) лишь необходимого объема материала. Отличие гидроимпульсного способа состоит в том, что рабочая жидкость подается не непрерывно, а порционно (соответственно импульсно), в остальном же метод аналогичен вышеописанным.

Суть водоструйного бурения заключается в том, что традиционного механическое бурение и роль инструмента выполняют струи воды высокого давления, подаваемые через струеформирующие элементы, совершающие вращательные движения вокруг своей оси при внедрении штаги по глубине грунтового массива. Основным достоинством данного метода является упрощение конструкции инструмента и отсутствие механического взаимодействия

³ ISO 8501-4: 2006 Подготовка стальной поверхности перед нанесением красок и относящихся к ним аналогичных продуктов. Визуальная оценка чистоты поверхности. Часть 4. Начальное состояние поверхности, качество подготовки и степень ржавости поверхности в результате оплавления в связи с впрыскиванием водяной струи высокого давления.

⁴ Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарев А.Е. Гидроабразивное резание горных пород. М.: МГГУ, 2003. 279 с.

бурового инструмента с обрабатываемым материалом, которые позволяют осуществлять работы без возникновения в инструменте больших усилий и крутящего момента, ведущих к значительному износу или в крайнем случае его поломке, тем самым есть возможность получать малоразмерные отверстия значительной глубины.

Все вышеперечисленные традиционные и новые ГСТ воплощаются путем создания конструкций гидроструйных установок и, несмотря на различия в конкретных конструкторских реализациях, все установки для вышеописанных методов могут быть рассмотрены одной типовой конструктивной схемой – компоновочная схема ГСТ. Составными компонентами схемы являются гидроинструмент, передающее устройство, источник высокого давления и гидромагистраль⁵.

Каждое из указанных составляющих обладает своей функциональностью в рамках компоновочной схемы. Установка комплексно состоит из сопла или форсунки, функционально являющихся струеформирующим устройством (рисунок 1, в)⁶ и вместе с элементами, обеспечивающими подачу струй в требуемом направлении представляют собой гидроинструмент, обеспечивающий движение рабочей жидкости (соответствующего состава) в заданных направлениях. Рассматривая конструкции передающего устройства (рисунок 1, а, б), нужно отметить, что одна и та же задача, т.е. функционал подобного устройства – это передача рабочей жидкости от неподвижного элемента во вращающийся⁷, остается неизменным [10], решается несколькими компоновками, применяемыми для различной величины давления рабочей жидкости ≤ 40 МПа и до 500 МПа: вертлюги и гидросъемники соответственно. В качестве источника высокого давления (рисунок 2, а), как правило, выступает изготавливаемый (с учетом постоянных нагрузок) плунжерный насос, оснащенный мультипликатором давления, конструкция которого достаточно унифицированная и позволяет, в зависимости от нужного давления и производительности, ме-

нять сам плунжер и некоторые смежные детали. Рассмотренные конструктивные узлы соединяются гидромагистралями (рисунок 2, б), которыми служат стандартизированные и применяемые в различных отраслях промышленности, рукава/трубопроводы высокого давления, поэтому они доступны для выбора на основании выходных параметров для применения в конкретных агрегатах.

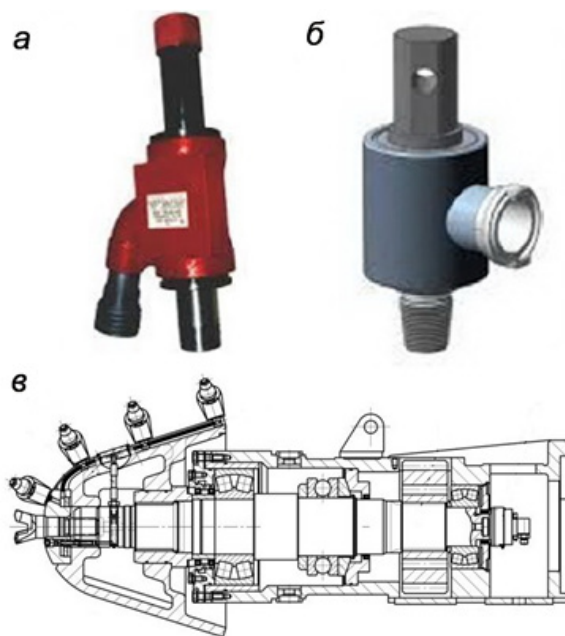


Рисунок 1 – Передающие устройства: а – вертлюг; б – гидросъемник струйной цементации грунтов; в – гидроинструмент для резания горных пород [2]

Figure 1 – Transmitting devices: a – swivel, b – the jet-grouting's hydro-puller device, v – hydraulic tools for cutting rocks [2].

На сегодняшний день последовательность проектирования установок ГСТ (на примере комплекта оборудования для струйной цементации грунтов) будет следующей (рисунок 3).

⁵ Жабин А.Б., Поляков А.В., Щеголевский М.М. Гидроструйные технологии в горном деле: практикум. М.: Горная книга, 2013. 399 с.

⁶ Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарев А.Е. Гидроабразивное резание горных пород. М.: МГГУ, 2003. 279 с.

⁷ 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, Санкт-Петербург, 27 октября 2022 г. СПбГАСУ. Санкт-Петербург, 2022. С. 121–129.



а



б

Рисунок 2 – Источники высокого давления (а) и рукава высокого давления (б) для ГСТ
Источник: взято из открытых источников.

Figure 2 – High pressure sources (by left) and high pressure hoses (by right) for hydro-jet technologies
Source: taken from open sources.

На первичном этапе определяются геометрические показатели гидроинструмента, как правило, выявляется диаметр струеформирующего элемента (сопла или форсунки), затем находятся технологические параметры для соответствующей гидроструйной технологии, например, расхода рабочей жидкости, соответствующий уже определенным параметрам оборудования для установки ГСТ, скорости вращения буровой колонны и ее линейного перемещения вдоль оси и с учетом отсутствия/наличия ограничения по наружному диаметру вала передающего устройства либо линейная скорость в области контактных поверхностей уплотнительных элементов с величиной наружного диаметра, либо только расход рабочей жидкости и линейная скорость соответственно. При условии превышения расхода рабочей жидкости, рассчитанного исходя из подобранных технологических параметров и диаметра струеформирующего устройства над той же величиной, но рассчитанной исходя из заданного наружного диаметра вала, происходит завершающий этап, т.е. округление значений до стандартного из ряда и получают входные параметры конструируемой установки или потребуется изменить величину диаметра. Однако в данной последовательно-

сти пренебрегают состоянием передающего устройства, которое определяет функционирование всей схемы.

Анализируя компоновочную схему как цепь передающих энергию конструктивных элементов, следует рассматривать её в рамках преобразования подводимой внешней энергии за счет функционирования основных узлов для транспортировки рабочей жидкости к месту реализации ГСТ и, исходя из того, что на этапе передачи энергии от одной составляющей к другой происходит изменение уровня энергетического потока (рисунок 4).

В конечном итоге вся подводимая энергия реализуется посредством гидроинструмента (см. рисунок 1, в) в кинетической энергии струи рабочей жидкости с конфигурацией, обеспечивающей получение требуемого результата в зависимости от вида ГСТ. Оценка эффективности или производительности данного узла осуществляется по количественному показателю «гидравлическая мощность», и по каждой подгруппе показатель может быть определен по соответствующей расчетной зависимости, поскольку на сегодняшний день тема проектирования гидроинструментов проработана достаточно глубоко^{8, 9} [8].

⁸ Бреннер В.А., Жабин А.Б., Щегольский М.М. Совершенствование гидроструйных технологий в горном производстве. М.: Горная книга, 2010. 337 с.

⁹ Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарев А.Е. Гидроабразивное резание горных пород. М.: МГГУ, 2003. 279 с.

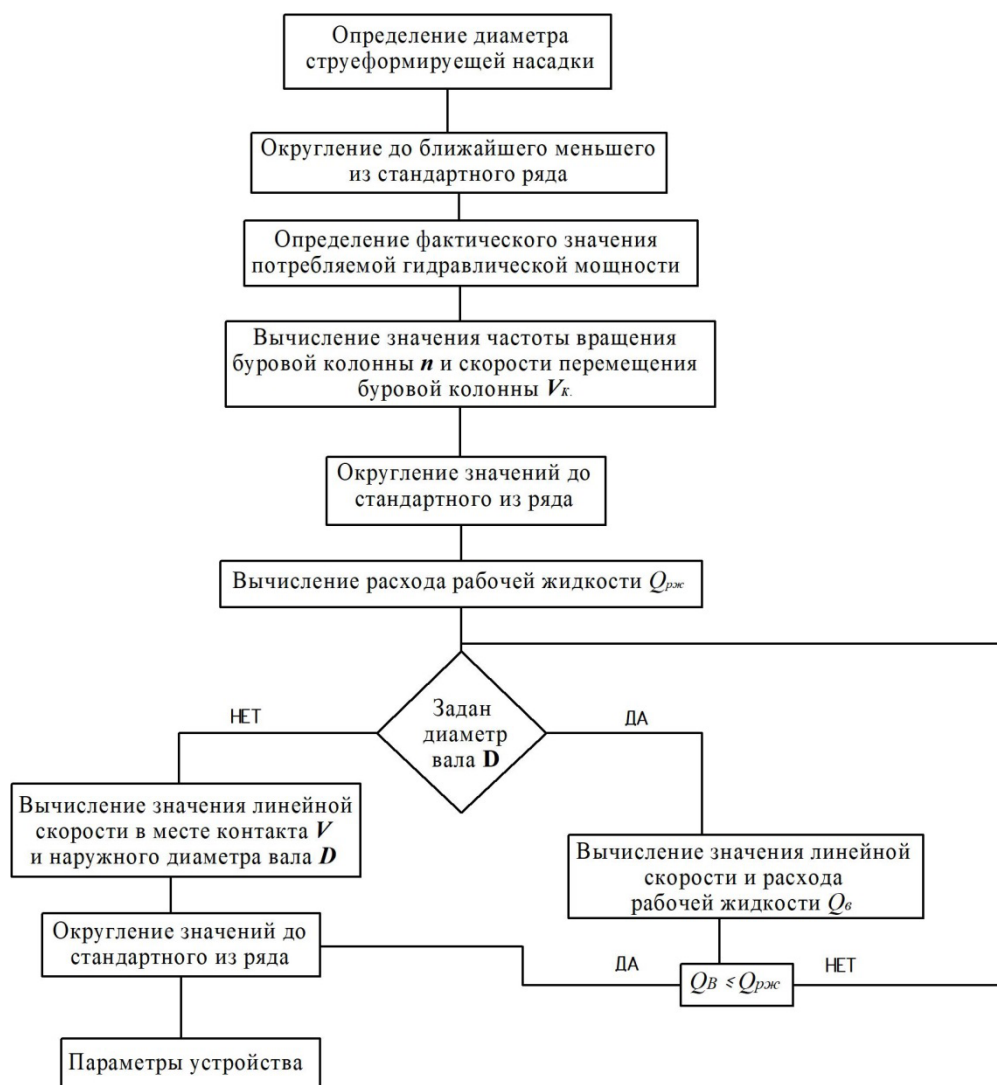


Рисунок 3 – Алгоритм подбора комплекта оборудования при СЦГ
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The selection algorithm for a jet-grouting equipment set
Source: compiled by the authors.

С другой стороны, в установке ГСТ располагается узел для первичной подачи энергии (источником высокого давления в системе является насос). Соответственно подводимая энергия трансформируется в нем в давление и механическое движение рабочей жидкости. Сегодня промышленность выпускает данные агрегаты в серийном формате и можно произвести оценку потерь по КПД, который в среднем составляет порядка 90–95%, а значит и потери давления рабочей среды составят от 5 до 10%.

Эти две точки, входная и выходная, компоновочной схемы соединяются гидромаги-

стралями – их роль выполняют рукава (трубопроводы) высокого давления. И очевидно здесь также есть гидравлические потери в силу физического перемещения рабочей жидкости. Оценка подобных потерь производится согласно закону Бернулли и уравнению Ньютона по потерям напора по длине и в местных сопротивлениях. Потери в трубопроводе будут определяться не только его основными геометрическими параметрами, но также параметрами рабочей жидкости и шероховатостью поверхностей [11] и определяется по формуле Дарси-Вейсбаха [12]:

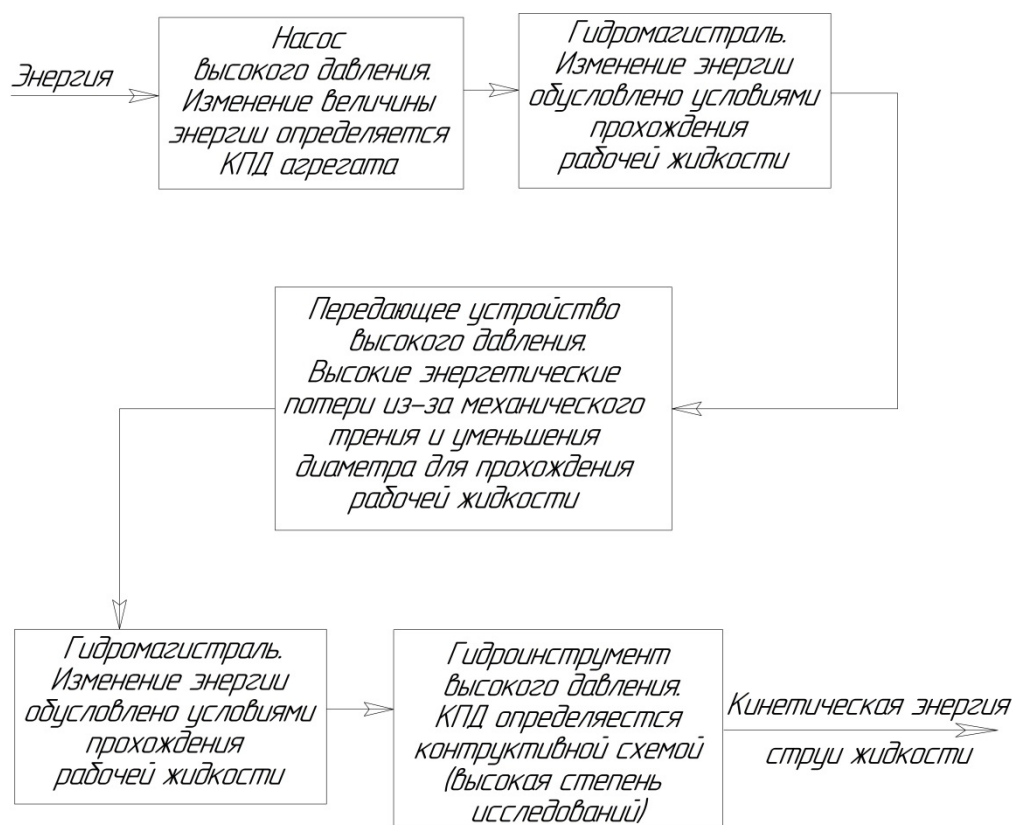


Рисунок 4 – Передача энергии при ГСТ
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Circuit of the power transfer with hydro-jet technologies
Source: compiled by the authors.

$$h = \lambda \frac{lV^2}{d2g},$$

где h – потеря напора, м; λ – коэффициент гидравлического трения; l – длина трубопровода, м; d – внутренний диаметр трубопровода, м; V – скорость потока жидкости, м/с; g – ускорение свободного падения – 9,81 м/с².

Формула является универсальной и применима для обоих видов течения рабочей жидкости с расчетом значения коэффициента гидравлического трения по отдельным зависимостям. Понятие «шероховатость» является комплексным и описывается в основном

двадцатью четырьмя количественными показателями, но для рассматриваемой ситуации определяющим будет то, что называется «абсолютная шероховатость» и рассчитывается через среднеарифметическое отклонение неровностей профиля шероховатости внутренней поверхности трубопровода. Использование в ходе эксплуатации показало, что степень влияния шероховатости определяется диаметром трубопровода и существует возможность пользоваться одним показателем – «относительная шероховатость», представляющим собой отношение эквивалентной шероховатости и внутреннего диаметра (Δ/d)^{10,11}.

¹⁰ ГОСТ 8.586.1–2005 ГСИ Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств: Межгосударственный стандарт: дата введения 2007-01-01 / Государственная система обеспечения единства измерений. Изд. официальное. М.: Стандартинформ, 2007.

¹¹ СП 42-101–2003 Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб: Свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2003-07-08 / Государственная система обеспечения единства измерений. Изд. официальное. М.: ЗАО «Полимергаз», ГУП ЦПП, 2003.

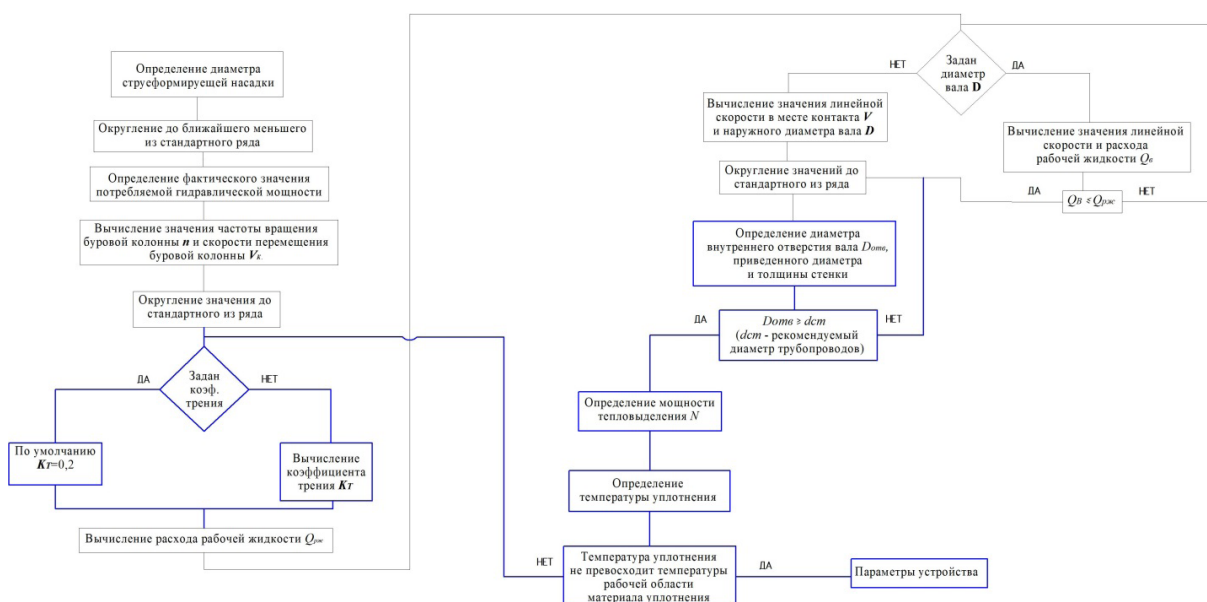


Рисунок 5 – Алгоритм подбора комплекта оборудования при СЦГ с учетом теплового состояния передающего устройства
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – The selection algorithm for a jet-grouting equipment set for the transmitting device's thermal state
Source: compiled by the authors.

Например, λ для ламинарного потока вычисляется по формуле Стокса¹² с использованием числа Рейнольдса (Re).

$$\lambda = 64/Re.$$

При турбулентном течении коэффициент гидравлического трения можно определить по эмпирическим формулам, для чего используют, например, формулу Альтшуля (формулу Блазиуса или формулу Шифринсона):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$$

где Re – число Рейнольдса; Δ – эквивалентная шероховатость; d – внутренний диаметр трубопровода, м.

Величина потерь в гидромагистралях зависит от диаметра трубы, средней высоты неровностей на ее внутренней поверхности и числа Рейнольдса, которые учитываются при расчете эквивалентной шероховатости и составляют порядка 3–7%.

Компоновочная схема была бы неполной без устройства (см. рисунок 1, а, б), призванного связать элементы, имеющие различ-

ную кинематику движения, т.е. в то время как источник давления должен быть неподвижен, то гидроинструмент должен двигаться (в большинстве случаев он совершает вращательное движение) и функция передающего устройства состоит в обеспечении передачи рабочей жидкости от неподвижного узла к подвижному. Такая конструкция приводит к тому, что эксплуатация передающих устройств сопровождается значительным тепловыделением в там, где происходит механическое трение. Величина тепловыделения может достигать значительных объемов (в пределах нескольких десятков процентов от подводимой мощности) [13] в местах контакта неподвижных уплотнительных элементов и вращающегося бурового вала, что негативно влияет на ресурс работы как самого устройства, так и гидроструйной установки в целом. Конструкция передающего устройства достаточно проста, но при этом она обуславливает две взаимоисключающие проблемы, напрямую влияющие на тепловое состояние механизма. Первая проблема вытекает из функционального назначения передающего устройства – механического трения, сопровождающегося значительным тепловы-

¹² Сергеев М.Н. Область применения формулы Стокса и Озена // Теория и практика модернизации научной деятельности в условиях цифровизации: сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Уфа РФ, 22 июля 2022 г.). Уфа: Omega science, 2022. С. 7–9.

делением. Для снижения потерь на трение в процессе проектирования придерживаются решений, направленных на минимизацию контактных поверхностей трения, т.е. задается минимально возможный наружный диаметр вала и, как следствие этого, получают минимальное по размерам само устройство. Однако такой подход, направленный на уменьшение объема выделяемого тепла, автоматически уменьшает проходное сечение для рабочей жидкости, т.е. минимизирует величину диаметра внутреннего отверстия и возникает другая проблема – падение величины давления (согласно закону Бернулли), вследствие снижения величины сечения потока скорость жидкости возрастает, что отрицательно отражается на гидравлической мощности (причем это без учета потерь на смену направления (на 90°) движения жидкости) – параметре, определяющем эффективность метода ГСТ (см. рисунок 1, б).

Обобщая вышеизложенное, следует сделать вывод о том, что основой, на которую необходимо опираться при разработке подобных конструкций, является тепловой баланс в устройстве, особенно с учетом повышенной чувствительности уплотнительных элементов к температурному воздействию [14] и, следовательно, будут подвергаться наибольшему износу в процессе работы, а значит, учтены должны быть обе обозначенные проблемы, для чего использовать можно три основные методики конструирования для таких устройств.

Данные методики позволяют учесть особенности работы передающих устройств (рисунок 5) и подбирать наиболее рациональные решения для соответствующего комплекта оборудования уже с учетом теплового баланса в них (передающих устройствах).

Первая методика (принцип изменения температуры) подразумевает влияние на величину выделяемой тепловой энергии за счет изменения уровня теплового потока, проходящего через элементы конструкции устройства. Добиться этого можно управляя геометрией вращающегося вала – уменьшая площадь контакта, за счет уменьшения наружного диаметра вала или увеличивая диаметр внутреннего отверстия для прохождения рабочей жидкости, тем самым улучшая охлаждение нагреваемых элементов. Также, базируясь на основах материаловедения и теплофизики, можно использовать материалы для данных изделий с более высокими коэффициентами теплопроводности [15].

Вторая методика (принцип изменения объема тепловыделения) основан на влиянии не на

следствие, а на причину появления тела в зоне контакта. Реализовать его можно либо регулируя технологические параметры метода ГСТ (давление, скорость вращения гидроинструмента и т.д.), либо создавая морфологию контактных поверхностей, более благоприятную для взаимодействия данных поверхностей, применяя определенный вид обработки [16].

Третья методика предполагает сбалансирование сочетания изменения факторов, влияющих на тепловой баланс, и позволяет разработать параметрический и типоразмерный ряды конструктивного исполнения для выбранного метода ГСТ. В то время как применение первых двух подходов рационально и обосновано в случае присутствия какого-либо ограничения к разрабатываемой конструкции, например, при ограничении геометрии вала или наличии определенных технологических параметров ГСТ.

Таким образом, предлагаемая последовательность принятия решений при конструировании гидроструйных установок включает в себя (см. рисунок 5, выделено синим) вышеописанные методики за счет таких этапов, как влияние коэффициента трения, определение диаметра внутренней полости вала с применением безразмерного приведенного показателя и учетом рекомендуемого проходного диаметра трубопровода для определенного ранее расхода рабочей жидкости и нахождения мощности тепловыделения в зоне контактных поверхностей (в процессе работы передающего устройства) с соответствующей температурой уплотнительных элементов как наименее термостойких составляющих конструктивного узла.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая вышеизложенное, необходимо сделать вывод, для того чтобы обеспечить оптимальное конструктивное исполнение передающего устройства высокого давления наиболее эффективная эксплуатация передающих устройств сверхвысокого давления для гидроструйных технологий возможна только с учетом теплового состояния конструктивного узла, характеризуемого описанием в них теплового баланса, который может быть обеспечен за счет разработки ряда методик, предлагаемых к применению для проектирования устройств подобного типа. Таким образом, организуя процесс проектирования и разработки, обеспечивающих не отдельное решение, а комплекс взаимосвязанных решений при подпоре рациональных параметров всей гидроструйной установки в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Borkowski P. Hydro-jetting method of bas-relief shaping // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011. V. 11, Issue 2. P. 267. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60142-3](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60142-3)
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. <https://www.researchgate.net/publication/364816487>
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; 14(16): 10383. <https://doi.org/10.3390/su141610383>
4. Ahmed B., Khoshnaw F. A., Raza M., Elmoineim 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. <https://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. V. 2677, Issue 12, <https://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. V. 2. <https://geotherm-journal.com/index.php/gtj/article/view/77>
7. Pourakbar M., Naziri S., Babaee E. Maleknia A.A. Case Study on Jet Grouting Application for Deep Excavation in Granular Soils // *Geo-Congress*. 2022. P. 386-394 <https://doi.org/10.1061/9780784484029.039>
8. 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. V.4. P. 235. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.09.004>
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. Article ID 8078527. 16 p. <https://doi.org/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. Карпов Д.Ф., Павлов М.В. Методика определения потерь давления на трение в круглом трубопроводе постоянного сечения // *Природообустройство*. 2023. № 1. С. 69–75. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-69-75
12. Ямилев М.З. [и др.] Модифицированные формулы гидравлического расчета нефтепровода для условий изотермического течения степенной жидкости // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2021. Т. 11, №. 4. С. 388–395. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2021-11-4-388-395>
13. 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.
14. Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Воронцов И.И. Методика моделирования теплового баланса элементов конструкции строительно-дорожных машин для струйной цементации грунтов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2019. № 3. С. 369–376. <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-03-369-376>
15. 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. <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2023-09-01-71-78>
16. 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>

REFERENCES

1. Borkowski P. Hydro-jetting method of bas-relief shaping. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011; V. 11, Issue 2: 267. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60142-3](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60142-3)
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. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/364816487>
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; 14(16): 10383. <https://doi.org/10.3390/su141610383>
4. Ahmed B., Khoshnaw F. A., Raza M., Elmoineim 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. <https://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. V. 2677, Issue 12, <https://doi.org/10.1177/03611981231168842>

portation Research Board. 2023; V. 2677, Issue 12. Available at: <https://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. *Geo-THERM*. 2023; V. 2. Available at: <https://geotherm-journal.com/index.php/gtj/article/view/77>

7. Pourakbar M., Naziri S., Babaee E. Maleknia A.A. Case Study on Jet Grouting Application for Deep Excavation in Granular Soils. *Geo-Congress*. 2022: 386–394. <https://doi.org/10.1061/9780784484029.039>

8. 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; V.4: 235. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.09.004>

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

10. 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.)

11. Karpov D.F., Pavlov M.V. Method of determining the friction pressure loss in a circular pipeline of constant cross-section. *Environmental Engineering*. 2023;(1): 69–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-1-69-75>

12. Yamilov M.Z. Modified formulas for hydraulic calculation of an oil pipeline for conditions of isothermal flow of power-law fluid. *Science & technologies: oil and oil products pipeline transportation scientific and technical journal*. 2021; V. 11. no 4: 388–395. (In Russ.) <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2021-11-4-388-395>

13. 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.)

14. Novikov V.I., Pushkarev A.E., Vorontsov I.I. The modeling of the heat balance elements of construction jet-grouting machines. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2019; No3: 369–376. (In Russ.) <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-03-369-376>

15. 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-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2023; 1: 71–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2023-09-01-71-78>

16. 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>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Новиков В.И. Постановка цели и задачи исследования; описание проблемы, с которой связано исследование; разработка алгоритма методики проведения исследования; обработка результатов проведения исследования; составление статьи; окончательное утверждение версии для публикации.

Кузьмин О.В. Обработка результатов проведения исследования; анализ и интерпретация данных; концепция и дизайн работы; составление статьи; итоговая переработка статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Novikov V.I. Purpose and objectives of the study statement; the problem with which the study is associated statement; the algorithm of the research methodology development; the results of the study processing; the article layout; final approval of the version for publication;

Kuzmin O.V. The results of the study Processing; data analysis and interpretation; concept and design of the work; the article layout; final revision of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новиков Виталий Иванович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Судебные экспертизы» 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

Кузьмин Олег Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Технологии строительных материалов и метрологии» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9171-9170>, **Researcher ID:** ABA-9562-2021, **Scopus Author ID:** 57741619000, **SPIN-код:** 9238-5680, e-mail: ov-kuzmin@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vitaly I. Novikov – Cand. Sci., Associate Professor, Forensics Department, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2 Krasnoarmeiskaia Street, 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

Oleg V. Kuzmin – Cand. of Sci., Associate Professor, Technology of Building Materials and Metrology Department, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2 Krasnoarmeiskaia Street, St Petersburg, 190005) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9171-9170>, **Researcher ID:** ABA-9562-2021, **Scopus Author ID:** 57741619000, **SPIN-код:** 9238-5680, e-mail: ov-kuzmin@yandex.ru