РАЗДЕЛ І

Научная статья УДК 620.1-1/-9 DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-652-661 EDN: PYUWOO



ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМА РАЗРЯДА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ШПУРОВОГО РАЗРУШЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

В.О. Барсуков

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПБГАСУ), г. Санкт-Петербург, Россия barsukovvyach@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье поднимаются проблемы, связанные с электрогидравлическим шпуровым разрушением негабаритных монолитных объектов, которые встречаются, в частности, на территории проведения строительных работ. На данный момент оценка эффективности внедрения технологии отсутствует, из чего следует: необходим метод обоснования оптимального режима разряда и его воспроизводимости на промышленных установках.

Цель статьи: обоснование оптимальных энергетических параметров для разрушения монолитных объектов шпуровым электрогидравлическим способом.

Материалы и методы. Произведен анализ факторов шпурового электрогидравлического разрушения монолитных объектов – выявлены наиболее значимые факторы. Предлагается характеризовать режим разряда набором параметров, отвечающих за переходные процессы в моменты разрушения проводника, длительностью разряда и количеством вводимой энергии, вычисление которых представлены на страницах публикации.

Результаты и обсуждение. На основании выявленных действующих факторов разработан стенд для регистрации явления электрогидравлического эффекта. Выведены параметры обеспечения воспроизводимости режима разряда в зависимости от изменения величины индуктивности разрядного контура. Предложено формирование области применения на основании анализа данных.

Заключение. Результаты исследования позволяют простое планирование эксперимента для оценки эффективности внедрения технологии. Статья заинтересует научные кадры в области электрогидравлических и электроимпульсных технологий, сотрудников организаций, задействованных в расчистке территорий от монолитных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрогидравлический эффект, электротермическое разрушение проводника, разрушение негабаритов, режим разряда, воспроизводимость режима разряда

Статья поступила в редакцию 30.07.2024; одобрена после рецензирования 13.09.2024; принята к публикации 17.10.2024.

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: Барсуков В.О. Обоснование режима разряда электрогидравлической установки для шпурового разрушения монолитных объектов // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 652-661. https://doi. org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-652-661

© Барсуков В.О., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

652

SUBSTANTIATION OF THE DISCHARGE MODE OF ELECTROHYDRAULIC EQUIPMENT FOR DRILLING DESTRUCTION OF MONOLITHIC OBJECTS

Vyachslav O. Barsukov

PART I

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Saint-Petersburg, Russia barsukovvyach@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The article raises the problems associated with electrohydraulic drilling destruction of oversized monolithic objects, which are found, in particular, on the territory of construction works. At the moment, there is no assessment of the technology effectiveness, which means that methods are needed to justify the optimal discharge mode and its reproducibility in industrial equipment.

The purpose of the article is substantiation of optimal energy parameters for destructing monolithic objects by using electrohydraulic drilling method.

Materials and methods. The analysis of factors contributing to electrohydraulic fracture of monolithic objects was carried out and the most significant ones were identified. It is proposed to characterize the discharge mode with a set of parameters related to the transitional processes at the moments of conductor destruction, the discharge duration and the amount of energy input. Calculation of the parameters has been presented in this paper.

Results and discussions. Based on the identified active factors, a stand for registration the electrohydraulic effect has been developed. Parameters for ensuring reproducibility of the discharge mode are derived depending on the change in the discharge circuit inductance. Practical implications are proposed based on data analysis.

Conclusion. The research findings advance a simple experiment planning to evaluate technology effectiveness. The article will be of interest to researchers in the field of electrohydraulic and electropulse technologies, and practitioners involved in clearing territories and removing monolithic objects.

KEYWORDS: electrohydraulic effect, electrothermal destruction of a conductor; destruction of oversized objects, discharge mode; reproducibility of discharge mode

The article was submitted 30.07.2024; approved after reviewing 13.09.2024; accepted for publication 17.10.2024.

The author 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: Barsukov O.V. Substantiaiton of the discharge mode of electrohydraulic equipment for drilling destruction of monolithic objects. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 652-661. https://doi. org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-652-661

© Barsukov O.V., 2024



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

653

ВВЕДЕНИЕ

В процессе возведения дорог, зданий и сооружений проводится очистка территорий от каменных валунов и прочих монолитных объектов, удаление которых без разрушения осложняют работу на строительной площадке¹ [1, 2]. Широко используются буровзрывной и механизированный методы. Тем не менее сопутствующие взрыву негативные аспекты, такие как образование пыли, разлёт осколков и выброс токсичных отходов, ограничивают применение взрывчатых веществ. Преимущества эксплуатации электрогидравлического оборудования при шпуровом разрушении монолитных объектов перед традиционными методами подробно отражены в источниках^{2,3,4,5} [1, 2, 3]. Вдобавок размещение предлагаемого оборудования возможно не только на стационарных платформах, но и на передвижных. Рассмотрениевопросаотражено в трудах⁶.

Решение о введении новых технологий принимается если не на основании возможности работы с задачами, невыполнимыми другими способами, то на основании более благоприятных энергетических параметров в сравнении с традиционными методами. Учитывая факт применения электрогидравлического эффекта (ЭГЭ) в зависимости от специфики выполнения задач⁷ [4, 5, 6, 7, 8], универсальный метод технического обоснования отсутствует. Далеко не для всех технологических процессов, задействующих ЭГЭ, существуют методы оценки внедрения в отрасль.

Относительно электрогидравлического шпурового разрушения монолитных объектов научных исследований ранее не проводилось. В литературе⁷ встречаются упоминания о проведении опытов по разрушению гранитных валунов. Однако обоснование режима разряда и критерии его выбора не публиковались.

Помимо оценки эффективности стоит обратить внимание на воспроизводимость оптимального режима разряда. На него непосредственно влияют характеристики разрядного контура – составной части электрогидравлического оборудования, которая изменяется от серии к серии [9, 10, 11, 12]. Поэтому актуальным вопросом остается повторение оптимального режима разряда на промышленном оборудовании, обеспечивая повышение уровня взаимозаменяемости техники.

Цель научно-исследовательской работы: разработка метода обоснования оптимальных энергетических параметров для разрушения монолитных объектов шпуровым электрогидравлическим способом.

Задачи:

 определение направленных на разрушение монолитных объектов значимых факторов;

² Там же. С. 13–20.

⁵ Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Ленинград: Машиностроение, 1986. С. 254.

⁶Барсуков В.О., Репин С.В. Указ. соч. С. 13–20.

⁷ Жданов Д.А. Экспериментальное исследование электрогидроипульсной формовки листового металла в открытую матрицу / Д.А. Жданов, Т.С. Мурзагалиев, Д.Г. Черников // XVII Королёвские чтения: Материалы Всероссийской молодёжной научной конференции с международным участием, посвящённой 35-летию со дня первого полёта МТКС «Энергия-Буран». В 2-х томах, Самара, 03–05 октября 2023 года. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. С. 61-62. EDN DSLRYM.



¹ Барсуков В.О., Репин С.В. Обеспечение безопасной эксплуатации передвижной электрогидравлической установки для дробления монолитных объектов // Современное состояние безопасности на транспорте и перспективы ее совершенствования: материалы Межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, Петергоф, 20 апреля 2022 года. Санкт-Петербург, Петергоф: Военный институт (инженерно-технический) – структурное подразделение Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева» министерства обороны Российской федерации, 2022. С. 13–20.

³ Барсуков В.О., Букиров Р.Р., Васильева П.В. Инновационные методы проведения работ по демонтажу зданий и сооружений с применением электрогидравлического оборудования // Актуальные проблемы современного строительства: материалы LXXIV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 5–9 апреля 2021 года. Том Часть 2. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. С. 28–34.

⁴ Барсуков В.О. Применение электрогидравлического эффекта для работ в условиях карьера // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 2 – 4 декабря 2020 года. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. С. 209–213.

- формулирование способов их регулирования;

- обеспечение воспроизводимости режима на промышленном оборудовании.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разрушение высокопрочных монолитных объектов посредством инициации разряда через проволоку в шпуре – специальная задача, решение которой требует учета множества одновременно протекающих процессов. Вариант аналитической оценки эффективности применения названного электрогидравлического устройства отсутствует. Единственный способ достоверного получения данных – проведение серии опытов для конкретного типа разрушаемого объекта. Автором рассмотрены явления, возникающие при разряде, и аргументирован выбор главных параметров при составлении плана эксперимента.

Ниже представлен механизм разрушения монолитного объекта (рисунок 1). В объекте пробуривается шпур, в который помещается электрод и вода. Разряду в шпуре предшествует накопление энергии на блоке конденсаторов, входящих в состав импульсного источника тока. При достижении критического значения напряжения на клеммах блока конденсаторов происходит пробой в разрядном промежутке между электродами. Из-за резкого увеличения сопротивления ток падает до нуля, не успев достигнуть хоть сколько-нибудь значительной величины (паузы тока), а все напряжение, практически равное напряжению заряда конденсаторной батареи, прикладывается к разрядному промежутку. Через образовавшийся ионный тоннель происходит разряд, в результате которого возникает ударная волна [3]. При соединении контактов рабочего промежутка тонкой проволокой происходит увеличение мощности разряда [13, 14, 15].

Рассмотрев технологию проведения работ⁸ [1, 2], следует принять во внимание ограничения, налагаемые на параметры разрядного контура при проведении эксперимента: диаметр проводника не может быть меньше 0,02 мм; вариация длины проводника, как и вариация индуктивности контура, не учитывается, оптимальный диаметр шпура – 30 мм. Отступление от названных пунктов влечет увеличение стоимости эксплуатации оборудования.



Рисунок 1 – Схема работы электрогидравлической установки [2]

Figure 1 – Operation of electrohydraulic equipment [2]



⁸ Барсуков В.О., Букиров Р.Р., Васильева П.В. Инновационные методы проведения работ по демонтажу зданий и сооружений с применением электрогидравлического оборудования // Актуальные проблемы современного строительства: материалы LXXIV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 5–9 апреля 2021 года. Том Часть 2. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. С. 28–34.

При этом качество разрушения не будет изменяться. Утверждение сформулировано при разработке лабораторной установки и его непосредственной апробации (рисунок 2).



Рисунок 2 – Результат разрушения гранитного валуна шпуровой электрогидравлической установкой [1]

Figure 2 – Result of destructing a granite boulder with electrohydraulic drilling equipment [1].

На электротермическое разрушение проводника в жидкости влияют характеристики разрядного контура (напряжение на клеммах конденсатора, емкость конденсатора, индуктивность и активное сопротивление разрядного контура); геометрия проводника (длина и диаметр) [14, 15]; свойства проводника (теплопроводность и электропроводность); свойства окружающей среды (плотность, электропроводность) [16, 17]. В ходе исследований разрушающей способности электрогидравлического удара посредством инициации разряда подводным электровзрывом проводника (ПЭВП) принято решение пренебречь варьированием ряда факторов, не оказывающих значительного влияния на формирование ударной волны [1].

Метод обоснования энергетических параметров электрогидравлической установки учитывает нецелесообразность реализации конструкции генератора импульсных токов со специальными параметрами контура индуктивности. Технология изготовления надежного высоковольтного дросселя индуктивности и малая насыщенность на рынке сказывается на его цене, которая может превышать стоимость производства остальных составляющих в разы⁹ [18]. Предлагается нивелировать исключение индуктивности разрядного контура

при исследовании разрушающего действия монолитных объектов генерируемой ударной волной посредством установления режима разряда с иными техническими параметрами электрогидравлической установки. Режим характеризуется переходными процессами в разрушающемся проводнике, длительностью разряда и количеством вводимой энергии.

Критерии подобия позволяют оценить переходные процессы и выведены путем логического анализа и постановкой контрольных экспериментов на основе осциллограмм [16, 19]. Идентичные кривые могут быть получены при различных сочетаниях параметров ПЭВП. П, П, и П, отображают качественные преобразования энергии на начальной стадии; стадии резкого спада и стадии разряда через продукты взрыва соответственно (система уравнений 1–3) [20].

$$\Pi_{1} = (R_{\rm tr} + R_{\rm trp})\sqrt{C/L}$$
(1)

$$\Pi_2 = \frac{C^{ST} \cdot U_0^2}{\sqrt{L} \cdot S^2 \cdot h^*} \quad \Big\}, \tag{2}$$

$$\Pi_3 = \frac{Al^2}{U_0^2 \sqrt{LC}}$$
 (3)

где <u>R</u> – сопротивление цепи, Ом;

 $R_{\rm mp}^{\ \ \mu}$ – сопротивление проводника, Ом; C – емкость блока конденсаторов, Ф;

L – индуктивность разрядного контура, Гн;

 U_0 – напряжение в момент пробоя, В;

5 – площадь сечения проводника, м²;

А – искровая постоянная, В² с/м²;

/ – длина проводника, мм;

 h^* – константа проводника, подверженного электротермическому разрушению.

подверженной Вычисление константы, электротермическому разрушению проволоки, производится по (4) [18]:

$$h^* = \rho_{\pi} \cdot \sigma_{\pi 0} (\lambda_{\pi} + \gamma_{\pi}), \qquad (4)$$

где ho_{π} – плотность проводника;

 $\sigma_{_{\rm II0}}$ – удельная электропроводность проводника;

*γ*_п – удельная теплота плавления проводника:

⁹ Применение электрогидравлического эффекта в промышленности и сельском хозяйстве / В.В. Терентьев, Д.В. Барабанов, А.Н. Шевяков, С.Ф. Смирнов // Сборник научных трудов кафедры теоретической и прикладной механики: Сборник статей. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2024. С. 80-87. EDN NYUHOG.



*V*_п – удельная теплота парообразования
металла.

Предпочтительная среда распространения ударной волны – вода. К главным преимуществам относится легкая доступность и безвредность в эксплуатации. Данные качества привлекли к себе внимание многих исследователей, труды которых позволили применять воду в качестве рабочей жидкости для решения широкого спектра задач [9, 10, 11, 12, 19].

ПЭВП сопровождается генерацией двойных волн¹⁰ [14, 15]. Время между их появлением зависит от диаметра проводника. Существует такой диаметр проводника, называемый оптимальным (5), при котором волны, сливаясь в одну, достигают максимальной мощности. Допустимо увеличение толщины, но не уменьшение, поскольку может возникнуть обрывание цепи разряда и энергия, предназначенная для разрушения высокопрочного материала, вернется на конденсаторную батарею [16].

$$d_{\rm off} = \left(\frac{W_o}{zh^*}\right)^{1/4}, \, \mathsf{M},\tag{5}$$

где W_{o} – запасенная энергия на конденсаторной батарее;

 z – волновое характеристическое сопротивление электрической цепи;

h^{*} – константа проводника, подверженного электротермическому разрушению.

Запасенная энергия на конденсаторной батарее (6):

$$W_0 = \frac{C \cdot U_0^2}{2}$$
, B. (6)

Вычисление волнового характеристического сопротивления электрической цепи:

$$z = \sqrt{L/C}, \tag{7}$$

где С – емкость блока конденсаторов, Ф;

L – индуктивность разрядного контура, Гн.

Длина проводника практически не влияет на распределение энергии при особенном расположении проволоки в шпуре. Расчет длины проводника производится на основании его оптимального значения (8) [21].

$$l_{\rm off} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot U_0 \cdot \sqrt[4]{L \cdot C}$$
 , m. (8)

Проведение серии опытов для определения режима разряда электрогидравлической установки в рамках двухуровневого трехфакторного эксперимента при следующих варьируемых факторах: диаметр медной проволоки d (0,02; 0,04 мм); напряжение на обкладках конденсаторной батареи U_0 (5; 10 кВ) и емкость конденсаторов C (10, 18 мкФ).d(5) определяет закономерность развития двойных волн и результирующей; U_0 – количество энергии W_0 (6), вкладываемой в разряд; C – длительность разряда $t_{\text{разр}}$ (9).

$$t_{\rm pasp} = \pi \sqrt{LC}$$
 , c. (9)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для регистрации воздействия ударной волны на окружающие объекты был разработан испытательный стенд (рисунок 3). Регистрация результатов доступно посредством фотофиксации и снятия осциллограмм. Продольно скользящие штоки одним концом упираются в стенки образца, а другим - в жестко закрепленные пластины. З штока расположены под углом 120 градусов относительно друг друга в горизонтальной плоскости и один в вертикальной. Момент разряда фиксируется камерой, поддерживающей частоту записи видео кадров в секунду, или осциллографами, снимающими данные с датчиков. Исходя из характера деформации пластин, определяется энергия, передаваемая на штоки и её интенсивность.



¹⁰ Соколов Н.С. Принципиальная схема генератора импульсных токов // Мировые научные исследования и разработки: современные достижения, риски, перспективы: материалы XIV Международной научно-практической конференции, Ставрополь, 30 октября 2023 года. Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью «Ставропольское издательство «Параграф», 2023. С. 242–246. EDN HSGCHA.

РАЗДЕЛ І ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ



Рисунок 3 – Испытательный стенд Источник: составлено автором.

Figure 3 – Test stand Source: compiled by the author.

По результатам проведения эксперимента выявляется оптимальный режим разряда, характеризуемый набором технических характеристик разрядного контура. Как указывалось ранее, индуктивность разрядного контура электрогидравлических установок может отличаться от серии к серии, что осложняет на промышленных установках воспроизводимость режима разряда, выявленного в результате проведения эксперимента. Предлагается обеспечивать требуемые значения критериев подобия, длительности разряда и количества вводимой энергии варьированием технических параметров при изменяемой индуктивности на основании формул 1-3, 6 и 9 по следующим зависимостям:

$$C_{02}(L_2) = \left(\frac{t_{\text{pasp}}}{2 \cdot \pi}\right)^2 \frac{1}{L_2}, \Phi;$$
 (10)



Рисунок 4 – Графики соответствия параметров: а – $C_{02}(L_2)$; б – $R_{\mu 2}(L_2)$; в – $U_{02}(L_2)$; г – $l_2(L_2)$ воспроизводимому режиму в зависимости от изменения индуктивности Источник: составлено автором.

Figure 4 – Diagram of matching parameters (a – $C_{02}(L_2)$; b – $R_{u2}(L_2)$; c – $U_{02}(L_2)$; d – $l_2(L_2)$) reproducible mode depending on variance of inductivity Source: compiled by the author.

$$R_{_{\rm II2}}(L_2) = 2 \cdot \pi \frac{\prod_1 \cdot L_2}{t_{_{\rm pa3p}}}, \, \text{Om;}$$
 (11)

$$U_{02}(L_2) = S_{\sqrt{\frac{\Pi 2 \cdot h^* \cdot \sqrt{L_2}}{C_{02}^{3/7}(L_2)}}}, \text{ B};$$
(12)

$$l_2(L_2) = U_{02}^{2}(L_2) \cdot \sqrt{\frac{\Pi_3 \cdot \sqrt{t_{pagp} / \pi}}{A}}, \text{ M}.$$
 (12)

При варьировании параметров согласно графикам (рисунок 4) действительна воспроизводимость режима разряда, установленного для лабораторной установки со следующими исходными данными разрядного контура:

• емкость конденсаторной батареи $C = 18 \cdot 10^{-6}$, Ф;

• напряжение на клеммах конденсаторной батареи $U_{0} = 5 \cdot 10^{3}$, B;

• индуктивность контура $L = 15 \cdot 10^{-6}$, Гн;

• активное сопротивление контура $R_{\rm u} = 20 \cdot 10^3$, Ом;

площадь сечения разрушающегося проводника S = 20·10⁻⁶

• длина разрушаемого проводника l = 0, 1, м;

• плотность проводника $\rho_{\rm n} = 8900$ кг/м³;

• удельная теплопроводность проводника $\sigma_{n0} = 59, 6 \cdot 10^6$, C°/м;

• удельная теплота плавления проводника $\lambda_n = 0,21\cdot 10^6$, Дж /кг;

• удельная теплота парообразования металла $\gamma_{\rm u} = 4.8\cdot 10^6,~{\rm Дж}$ /кг;

искровая постоянная $A = 10^4, B^2 \cdot c/m^2$.

Графики а, в, г имеют экспоненциальный характер изменения характеристик в отличие от линейного б. Активное сопротивление цепи, *R*_и; напряжение на клеммах имеют тенденцию к росту U₀; длина разрушаемого проводника *l* увеличивается с ростом индуктивности, а емкость конденсаторной батареи С – уменьшается. Стоит отметить, воспроизведение установленного режима экономически целесообразно в ограниченных условиях. Так, анализируя зависимость $C_{02}(L_2)$ на обозреваемом оборудовании, выполнение задач доступно в рабочем интервале $C_{02}(L_2)$ =3 ... 30 мкФ; L=2,3 ... 23 мкГн. Выбор параметров вне указанной области приводит к строгому соответствию характеристик разрядной цепи, что влечет за собой увеличение стоимости оборудования и усложнение его эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования обоснованы параметры режима разряда и предложен способ его воспроизводимости на промышленном оборудовании для электрогидравлического шпурового способа разрушения монолитных объектов.

Определены направленные на разрушение значимые факторы (переходные процессы в разрушающемся проводнике, длительность разряда и количество вводимой энергии), регулирование которыми осуществляется тремя параметрами: диаметром проводника, напряжением на клеммах конденсаторной батареи и ее емкостью. Воспроизводимость режима характеризуется в свою очередь четырьмя в соответствии с формулами (10) – (13): напряжением на клеммах конденсаторной батареи и ее емкостью; активным сопротивлением цепи; длиной разрушаемого проводника. Выявлена специфика воспроизводимости режима разряда, связанная с определением области применения технологии.

Представленная методика является основанием для оценки внедрения технологии в отрасль. На данный момент в ней заинтересованы организации, связанные с подготовкой территорий к строительству; дроблением горных пород и освобождением участков складирования негабаритов.

список источников

1. Барсуков В.О., Репин С.В., Зазыкин А.В. Расчёт энергозатрат установки для электрогидравлического разрушения монолитных объектов / В.О. Барсуков, С.В. Репин, А.В. Зазыкин [и др.] // Строительные и дорожные машины. 2022. № 6. С. 23–25.

2. Барсуков В.О., Репин С.В., Зазыкин А.В. Электрогидравлическая установка для разрушения валунов и монолитных конструкций при производстве строительных работ / В.О. Барсуков, С.В. Репин, И.И. Воронцов [и др.] // Грузовик. 2022. № 4. С. 38–41.

3. Мартынов Н.В., Добромиров В.Н., Барсуков В.О., Аврамов Д.В. Электрогидравлическая технология разрушения объектов // Горная промышленность. 2021. № 2. С. 132–136. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-132-136.

4. Савенко Э.С., Савенков Н.В., Матвиенко С.А., Каспарьянц А.Г. Моделирование процесса электроразряда при восстановлении поршневых пальцев ДВС // Вестник СибАДИ. 2024; 21(2): 242– 255. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-242-255. EDN: IHTOCP

5. Ефимова А.М. Эффективные способы демонтажа железобетонных конструкций // Наукосфера. 2024. № 1-2. С. 162–168. EDN VMFZOQ.



6. Ким К.К. Использование электрогидроимпульсного эффекта в железнодорожной отрасли / К.К. Ким. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. 203 с. ISBN 978-5-4486-0730-1. EDN EXSJFU.

7. Юницкий А.Э., Першай Н.С., Арнаут С.А. Исследование влияния электрогидроудара на измельчение бурого угля как компонента почвогрунта // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. 2023. № 2(14). С. 64–73. EDN IIAYSD.

8. Liu K. et al. Study on the coaxial electrode in electrohydraulic shockwave drilling technology // Geoenergy Science and Engineering. 2023. T. 231. P. 212284.

9. Le Mentec R. et al. Electrohydraulic crimping of tubes within rings // Metals. 2023. T. 13. №. 8. P. 1382.

10. Wang Z. et al. Antisymmetric deformation behavior during eccentric explosion electro-hydraulic sheet forming processs // Materials and Manufacturing Processes. 2023. T. 38. №. 6. P. 692–700.

11. Косенков В.М. Влияние объема цилиндрической разрядной камеры с жесткими стенками на поле давления в заполняющей ее воде // Электронная обработка материалов. 2022. Т. 58, №. 2. С. 68–80.

12. Akiyama H. Streamer discharges in liquids and their applications // IEEE Transactionson Dielectrics and Electrical Insulation. 2000. vol. 7. No. 5. pp. 646–653.

13. Jones H.M., Kunhardt E.E. The influence of pressure and conductivity on the pulsedbreakdown of water // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1994. vol.1. pp. 1016–1025.

14. Knyazyev M., Holzmüller M., Homberg W. Investigation of pressure fields generated by two simultaneous discharges in liquid initiated by wires // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2023. T. 7. №. 1. P. 40.

15. Ledoux Y. Experimental investigation of the pulse duration on the efficiency and electrode wear of electrohydraulic forming process // Manufacturing Review. 2023.T. 10. P. 17.

16. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Монография. Киев: Науковадумка, 1986. 206 с.

17. Mackersie J.W., Timoshkin I.V., Mac.Gregor S.J. Generation of high-power ultrasound by spark discharges in water // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. vol. 33. pp. 1715–1724.

18. Locke B.R., Sato M., Sunka P., Hoffmann M.R., Chang J.-S. Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment, Industrial and engineering chemistry research: American Chemical Society. 2006. vol. 45. No 3. pp. 882–905.

19. Wei Y., Zhang F., Wei B., Xu H., He K. Experimental and numerical analyses of tubular electrohydraulic forming process // Key Engineering Materials. 871(2021). pp. 80–86.

20. Дерен Ф.Д., Пепин В.М., Васильев А.Н. Моделирование переходных процессов в цепях формирования высоковольтных импульсов // Агротехника и энергообеспечение. 2023. № 2(39). С. 29–37. EDN ATNHLF.

REFERENCES

1. Barsukov V.O., Repin S.V., Zazykin A.V., Kobzar A.A., Khovalyg N.D.K. Energy consumption's calculation monolithic object's electrohydraulic destruction. *Construction and road machines*. 2022; 6: 23–25 (In Russ.).

2. Barsukov V.O., Repin S.V., Vorontsov I.I., Orlov D.S., Riznyk A.A. Electrohydraulic installation for destruction of boulders and monolithic structures during construction works. *Truck.* 2022; 4: 38–41 (In Russ.).

3. Martynov N.V., Dobromirov V.N., Barsukov V.O., Avramov D.V. Electrohydraulic Technology for Breaking Solid Objects. *Gornaya promyshlennost* = *Russian Mining Industry.* 2021;(2):132–136. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-132-136.

4. Savenko E.S., Savenko E.S., Matvienko S.A., Kasparyants A.G. Electric discharge process modelling when piston pins recovery in internal combustion engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024;21(2):242-255. (In Russ.) https:// doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-242-255. EDN: IHTOCP

5. Efimova A.M. Effective ways of dismantling reinforced concrete structures. *Nauko – sfera*. 2024; 1-2: pp. 162-168. EDN VMFZOQ (In Russ.)

6. Kim K.K. The use of the electrohydroimpulse effect in the railway industry. Saratov: Al–Pi–Er–Media, 2019. 203 p. ISBN 978-5-4486-0730-1. EDN EXSJFU. (In Russ.)

7. Yunitskiy A.E., Arnaut S.A., Pershai N.S. Influence of electrohydraulic impact on the brown coal grinding as a soil component. *Bulletin of the Baranovichi State University. Series: Technical Sciences*. 2023; 2(14): 64–73. EDN IIAYSD (In Russ.).

8. Liu K. et al. Study on the coaxial electrode in electrohydraulic shockwave drilling technology. *Geoenergy Science and Engineering*. 2023; T. 231: 212284. https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212284.

9. Le Mentec R. et al. Electrohydraulic crimping of tubes within rings. *Metals*. 2023; T. 13. no 8: 1382. https://doi.org/10.3390/met13081382.

10. Wang Z. et al. Antisymmetric deformation behavior during eccentric explosion electro-hydraulic sheet forming process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2023; T. 38. no 6: 692–700. https://doi.org/ 10.1080/10426914.2022.2116041.

11. Kosenkov V. M. Cylindrical discharge chamber's volume with rigid walls dependence on the pressure field in the water. *Electronic processing of materials*. 2022; vol. 58. No. 2: 68–80 (In Russ.).

12. Akiyama H. Streamer discharges in liquids and their applications. *IEEE Transactionson Dielectrics and Electrical Insulation*. 2000; vol. 7. No. 5: 646–653. DOI: 10.1109/94.879360

13. Jones H.M., Kunhardt E.E. The influence of pressure and conductivity on the pulsedbreakdown of water. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1994; vol.1: 1016–1025. DOI: 10.1109/94.368641 14. Knyazyev M., Holzmüller M., Homberg W. Investigation of pressure fields generated by two simultaneous discharges in liquid initiated by wires. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023; T. 7. №. 1: 40. https://doi.org/10.3390/jmmp7010040

15. Ledoux Y. Experimental investigation of the pulse duration on the efficiency and electrode wear of electrohydraulic forming process. *Manufacturing Review.* 2023; T. 10: 17. https://doi.org/10.1051/mfreview/2023016.

16. Krivitsky E.V. *Dynamic of an electric explosion in a liquid.* Kiev: Naukova dumka, 1986: 206 (In Russ.).

17. Mackersie J.W., Timoshkin I.V., Mac.Gregor S.J. Generation of high-power ultrasound by spark discharges in water. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2005; vol. 33: 1715–1724. DOI: 10.1109/ TPS.2005.856411.

18. Locke B.R., Sato M., Sunka P., Hoffmann M.R., Chang J.-S. Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment. *Industrial and engineering chemistry research: American Chemical Society.* 2006; vol. 45. No 3: 882–905. https://doi. org/10.1021/ie050981u.

19. Wei Y., Zhang F., Wei B., Xu H., He K./ Experimental and numerical analyses of tubular electrohydraulic forming process. *Key Engineering Materials*. 871(2021): 80–86. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.871.80. 20. Deren F.D., Repin V. M., Vasiliev A.N. Simulation of transient processes in high-voltage pulses formation circuits. *Agrotechnics and energy supply*. 2023; 2(39): 29-37. EDN ATNHLF. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Барсуков Вячеслав Олегович – аспирант автомобильно-дорожного факультета 3-го года обучения по направлению 05.05.04 – Дорожные строительные и подъемно-транспортные машины Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 3-я Красноармейская улица, 3/6), **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-2548-5309, **SPIN-код:** 1034-2869, e-mail: barsukovvyach@ yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Barsukov Vyachslav O. – a 3rd year postgraduate student of automobile and road department of 05.05.04 program – Road construction and hoisting and transporting machines of St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (190005, St. Petersburg, 3rd Krasnoarmeyskaya Street, 3/6), **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-2548-5309, **SPINcode:** 1034-2869, e-mail: barsukovvyach@yandex.ru.