

УДК 622.23.05; 621.9.044

## **ЭЛЕКТРОГИДРО-ИМПУЛЬСТУК УРАТУУ ЫКМАСЫН КОЛДОНУУДА ТЕКТИН БЕТИНДЕГИ БАСЫМДЫ АНЫКТОО**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРОДЫ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОМ СПОСОБЕ РАЗРУШЕНИЯ**

### **DETERMINATION OF PRESSURE ON THE ROCK SURFACE IN THE ELECTROHYDRO-PULSED DESTRUCTION METHOD**

**Ж. Усубалиев, К. Т. Эликбаев, Н. Бузурманкулов, Н. Ж. Телтаев**  
**Zh. Usubaliev, K. T. Elikbaev, N. Buzurmankulov, N. Zh. Teltaev**

*Бул макалада электрогидроимпульстук ыкма менен иштетилүүчү объекттин бетине жасалган басымды аныктоонун көз карандылыктары каралган. Чектелген көлөмдөгү суудан жогорку вольттогу электр чыңалуу өткөндө дүрмөттөөнү пайда болуп, ал сууну буулантып, жогорку температурадагы жана жогорку басымдуу буу-аба булутун пайда кылат. Бул иште ушул булуттун өлчөм мүнөздөмөлөрү, б.а. ылдамдыгы, басымы, дүрмөттөөнү камерасында сокку толкунунун жайылуу алыстыгы аныкталды. Бернулли теңдемесинин жардамы менен көзчоргонун чыгышындагы буу-аба аралашмасынын агым ылдамдыгы аныкталды. Андан ары белгилүү көз карандылыктар боюнча тоо тектеринин бетине таасир этүүчү басым аныкталган. Табылган чоңдук ар түрдүү тоо тектеринин бышыктыгы менен салыштырылып, электрогидроимпульстук ыкма тоо тектерди уратууда ишке ашары далилденди.*

*В данной статье рассматриваются зависимости определения давления на поверхности объекта обработки электрогидроимпульсным способом. При пропускании высоковольтного напряжения в ограниченном объеме воды происходит разряд, который испаряет воду, создавая высокое давление паровоздушного облака высокой температуры. В работе определены параметры этого облака: скорость, давление, дальность распространения ударной волны в разрядной камере. С помощью уравнения Бернулли определена скорость потока паровоздушной смеси на выходе из сопла. Далее по известным зависимостям определено действующее давление на поверхности горной породы. Найденная величина сравнивалась с прочностью различных горных пород.*

*This article discusses the dependence of determining the pressure on the surface of the processing object by the electrohydropulse method. When a high-voltage voltage is passed in a limited volume of water, a discharge occurs, which evaporates the water, creating a high pressure vapor-air cloud of high temperature. The paper defines the parameters of this cloud: velocity, pressure, range of propagation of the shock wave in the discharge chamber. Using the Bernoulli equation, the flow rate of the steam-air mixture at the outlet of the nozzle is determined. Further, according to the known dependencies, the acting pressure on the rock surface is determined. The found value is compared with the strength of various rocks.*

**Түйүн сөздөр:** *электрогидроимпульстук ыкма, басым, бышыктык чеги, электр дүрмөттөөнү, сокку толкуну, буу булуту, дүрмөттөөнү өзөгү.*

**Ключевые слова:** *электрогидроимпульсный способ, давление, предел прочности, электрический разряд, ударная волна, паровоздушное облако, канал разряда.*

**Keywords:** *electrohydropulse method, pressure, tensile strength, electric discharge, shock wave, vapor cloud, discharge channel.*

Электрогидравлический эффект (эффект Юткина) представляет собой процесс мгновенного образования механической энергии за счет высоковольтного электрического разряда в ограниченном объеме воды [1]. Открытый в 30-х годах 20 века советским ученым и изобретателем Львом Юткиным данный эффект нашел применение во многих отраслях народного хозяйства, начиная от сельского хозяйства, машиностроения и вплоть до горного дела [2, 5].

Суть данного эффекта заключается в мгновенном испарении ограниченного объема воды в разрядной камере при прохождении импульса высоковольтного электрического тока с образованием паровоздушной смеси высокого давления и температуры (рис. 1) [5].

В последние годы электрогидроимпульсный эффект находит все больший интерес в применении в горном деле при безвзрывном бурении скважин, производстве свай, горизонтального прокола дорожного полотна при прокладке коммуникаций (рис. 2) [3].

Технологией электрогидроимпульсной проходки породы занимались такие исследователи, как А. И. Иоффе, К. А. Наугольных, Н. А. Рой, Е. В. Кривицкий, Н. Д. Ахметов, М. М. Гимадеев, В. Н. Друлис, и др. Однако их исследования базировались на

уравнениях классической механики сплошной среды с некоторыми уточнениями законов сохранения энергии, массы, импульса, количества движения [2, 6, 9, 11]. Были созданы экспериментальные образцы электрогидроимпульсных установок для бурения скважин, но до промышленных образцов дело не дошло [17, 18].

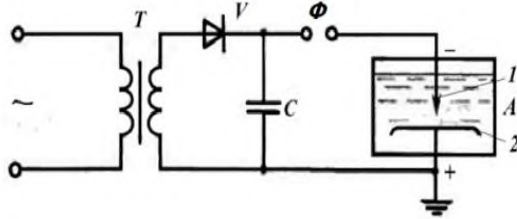


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема получения электрогидравлического эффекта:  
 Т – трансформатор, V – выпрямитель,  
 Ф – формирователь импульсов, С – конденсатор,  
 А – разрядная камера, 1 и 2 – электроды

Целью данной работы является определение давления при электрогидроимпульсном способе бурения скважины на поверхности конкретной горной породы при известной её прочности. Для применения этого эффекта при бурении породы поток паровоздушной смеси необходимо направить в зону обработки, что решается конструктивным исполнением бурового снаряда (рис. 2,б).

Из курса сопротивления материалов известно, что разрушение материала происходит при превышении внешней нагрузки предела прочности материала, т.е. когда возникает условие статического нагружения для гарантированного разрушения:

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{сж}}{S_{к}} > [\sigma_{сж}], \quad (1)$$

где  $F_{сж}$  – внешняя разрушающая сила на поверхности материала, Н;  
 $S_{к}$  – площадь контакта внешней силы с поверхностью, м<sup>2</sup>.

При динамическом нагружении материала струёй жидкости (рис. 2, а) или ударной волной паровоздушного облака или газа (рис. 2, б) действуют такие параметры, как скорость  $V_{ув}$ , давление  $P_{к}$  и плотность  $\rho$ . Тогда, учитывая связь давления и прочности [4], зависимость (1),

заменяя скорость потока струи воды на скорость потока ударной волны паровоздушного облака, можно представить как:

$$P_k = \frac{F_{сж}}{S_k} = \frac{\rho_{см} \cdot V_{ув}^2}{g} \geq [\sigma_{сж}], \quad (2)$$

где  $V_{ув}$  – скорость ударной волны (УВ) паровоздушного облака, м/с;  $\rho_{см}$  – плотность паровоздушного облака, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

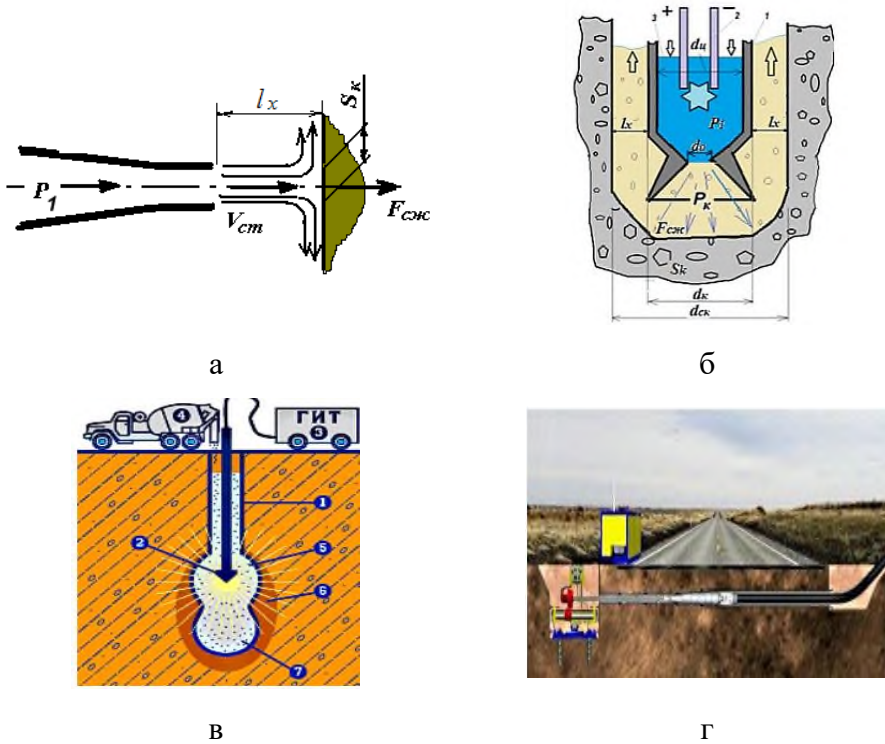


Рисунок 2 – Применение электрогидроэрозивной технологии: бурение скважин (а), производство свай (б), прокладка коммуникаций (в, г)

Приводим краткую информацию о стадиях формирования токопроводящего канала, замыкающего межэлектродный промежуток. Накопленный в конденсаторах ток с помощью формирователей импульса тока  $\Phi$  (рис.1) порционно подается на электроды 1 и 2, находящиеся в разрядной камере А, заполненной водой. В этот момент возникает электрический разряд, образующий токопроводящий канал, который состоит из двух стадий: первой – **канальной стадии**,

характеризующейся резким возрастанием тока и быстрым выделением энергии. Это приводит к нагреву воды в канале разряда до температуры порядка 10000 К и повышению в нем давления до 1000 МПа, и второй – **послеразрядной стадии**, когда после окончания выделения электрической энергии происходит расширение парогазовой полости, являющейся источником интенсивного потока парогазового облака, реализуемого на практике для воздействия на объект обработки.

Исследователями высоковольтного электрического разряда в воде [6] на базе промышленного генератора импульсных токов ГИТ-50 были экспериментально определены скорость и дальность распространения ударной волны паровоздушного облака, которая составила  $V_{ув} = 1722 - 1860$  м/с и  $l_x$  – порядка 0,1 м. Исходными данными явились такие параметры: ёмкость конденсаторных батарей  $C = 4$  мкФ, индуктивность разрядного контура  $L = 1,65$  мкГн, расстояние между электродами  $l_p = 20$  мм, величина разрядного напряжения  $U$  изменялась в пределах от 13 до 26 кВ.

Для оценки разрушающей способности УВ необходимо определить давление на её фронте  $P_k$ .

1. Радиус фронта УВ в момент времени  $t_p$ :

$$R_p = R(t_p) = c_o \cdot t_p, \quad (3)$$

где  $c_o$  – скорость звука в воде; по имеющимся данным  $c_o = 1480$  м/с.

2. Для определения давления на фронте ударной волны область распространения УВ условно разбита на три участка (см. рис. 3) [8, 9]:

– область цилиндрической симметрии ( $c_o t_p < R < 200 l_p$ );

$$(c_o t_p < R < 2,0 l_p) = (0,012 < R < 2,0 \cdot 0,01) = (0,012 < R < 0,02) \quad (4)$$

– переходная область

$$(2,5 l_p \leq R < 5,5 l_p) = 2,5 \cdot 0,01 \leq R < 5,5 \cdot 0,01 = 0,025 \leq R < 0,055 \quad (5)$$

– область сферической симметрии

$$(5,5 l_p \leq R < 200 l_p) = 0,055 \leq R < 2,0 \quad (6)$$

где  $R$  – расстояние от оси канала электрического разряда (КЭР) до фронта УВ.

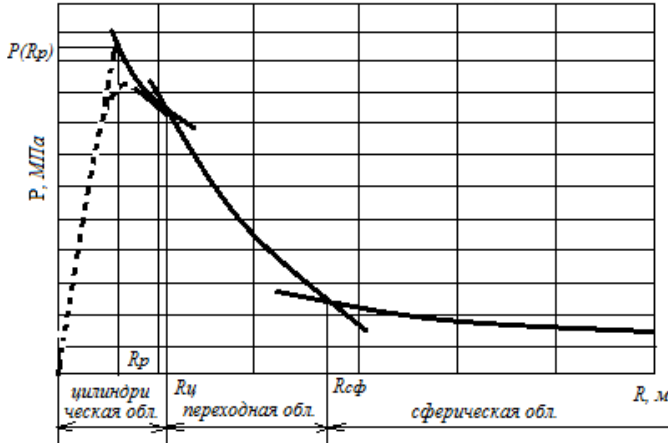


Рисунок 3 – Изменение давления на фронте УВ в зависимости от расстояния  $R$

По результатам экспериментальных исследований [6, 11] стало известно, что при высоковольтном электрическом разряде в воде давление в цилиндрической области мгновенно возрастает до значительных значений (рис. 3), затем с увеличением радиуса распространения ударной волны падает в переходной области, и уже в сферической области ударная волна взаимодействует с обрабатываемой поверхностью.

Для определения относительной плотности воды  $\rho$  в возмущенной среде по эмпирическим зависимостям, исходя из параметров разрядного контура, сперва определим критерии подобия  $\Pi_p$  [7, 8]:

$$\begin{aligned} \text{при } U = 13 \text{ кВ } \Pi_p &= \frac{A \cdot I_p^2}{U^2 \cdot t_p} = 7,33 \cdot 10^{-6} \\ \text{при } U = 26 \text{ кВ } \Pi_p &= \frac{A \cdot I_p^2}{U^2 \cdot t_p} = 2,34 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (7)$$

где  $A$  – искровая характеристика, для технической воды  $A \sim 10^2 B^2 \cdot \text{с/м}^2$  [8, 9, стр.17];

второй критерий подобия – доля энергии, выделяющейся в канале за 1-й полупериод тока:

$$\begin{aligned} \text{при } U = 13 \text{ кВ } \eta &= \sqrt[3]{\pi \cdot P_p} = 0,41, \\ \text{при } U = 26 \text{ кВ } \eta &= \sqrt[3]{\pi \cdot P_p} = 0,19 \end{aligned} \quad (8)$$

Для определения требуемого давления воспользуемся зависимостью, приведенной в работе [11]:

$$P_{\text{Ксф}} = \frac{1,33b_1(P_p) \rho^{\frac{3}{8}} \cdot U^{\frac{5}{4}} \cdot C^{\frac{1}{4}}}{R^{1,33} \cdot L^{\frac{3}{8}}}, \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность воды в возмущенной среде,  $\text{кг/м}^3$ ,  $b_1(P_p)$  – безразмерная функция критерия  $P_p$ :

$$b_1(P_p) \approx 0,37 P_p^{\frac{1}{3}} \cdot e^{-12P_p} = 0,0072 \quad (10)$$

здесь  $e = 2,71828$  – число Эйлера, (математическая константа).

Максимальный ток разряда определяется по формуле [5]:

$$\begin{aligned} \text{при } U = 13 \text{ кВ } i_{\text{max}} &= U \sqrt{\frac{C}{L} (1 - 0,65\eta^2)} = 19,04 \text{ кА}, \\ \text{при } U = 26 \text{ кВ } i_{\text{max}} &= U \sqrt{\frac{C}{L} (1 - 0,65\eta^2)} = 40 \text{ кА} \end{aligned} \quad (11)$$

По максимальному току разряда определяется относительная плотность воды в возмущенной среде из приведенной таблицы, согласно данным [9], используя линейную интерполяцию в пределах диапазонов:

$i_{\text{max}}, \text{кА}$	0	12	60	650
$\rho/\rho_0$	1,00	1,03	1,13	1,34

Отсюда, интерполируя, имеем относительную плотность воды:

при  $U = 13 \text{ кВ}$  и  $i_{\text{max}} = 19,04 \text{ кА}$ ,  $\rho = 1,049 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;

при  $U = 26 \text{ кВ}$  и  $i_{\text{max}} = 40 \text{ кА}$ ,  $\rho = 1,088 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Исходя из вышеизложенного, разрушение породы происходит в сферической области распространения ударной волны, но так как и давление, и скорость распространения ударной волны уменьшаются по мере увеличения радиуса распространения фронта ударной волны,

то расстояние от оси разряда до поверхности обработки целесообразно выбрать ближе к началу образования сферической области.

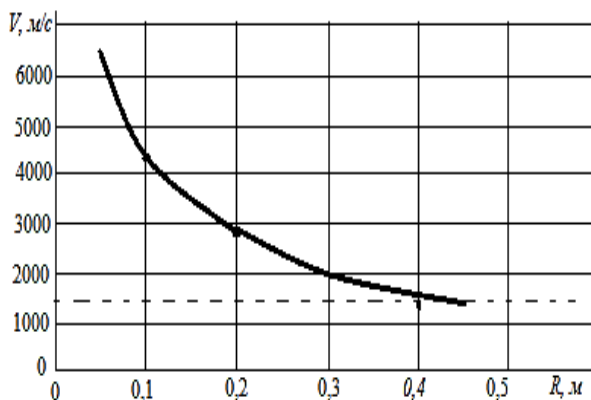


Рисунок 4 – Изменение скорости перемещения фронта УВ в зависимости от радиуса его распространения R

Ориентируясь на зависимость (6) и диаграмму изменения давления на фронте УВ в зависимости от расстояния R (рис. 3), его следует принять не менее 0,055 м. Тогда диаметр буримой скважины (рис. 1, а) должен быть:

$$d_{ск} > 2R_{сф} + 2l_x, \quad (12)$$

где  $l_x$  – расстояние между диаметром корпуса бурового снаряда и стенкой скважины для откачки пульпы и очистки от продуктов разрушения.

В связи с отсутствием конкретного назначения буримой скважины и из-за большого диапазона диаметров скважин для количественной оценки примем диаметр скважины  $d_{ск} = 250 \text{ мм} = 0,25 \text{ м}$ . Тогда радиус распространения УВ составляет:

$$R_{сф} = d_{ск} / 2 = 0,25 / 2 = 0,125 \text{ м}.$$

Подставив значение  $R_{сф}$  в формулу (9) определения давления УВ, приведенную в [11], для сферической области, определим давление на фронте УВ:

при  $U = 13 \text{ кВ}$ ;

$$P_{сф} = \frac{1,33 \cdot 0,0072 \cdot (1,049 \cdot 10^3)^{\frac{3}{8}} \cdot (13)^{\frac{5}{4}} \cdot 4^{\frac{1}{4}}}{0,125^{1,33} \cdot 1,65^{\frac{3}{8}}} = 372,6 \text{ МПа}, \quad (13)$$



при  $U = 26 \text{ мВ}$ ;

$$P_{сф} = \frac{1,33 \cdot 0,0072 \cdot (1,049 \cdot 10^3)^{\frac{3}{8}} \cdot (26)^{\frac{5}{4}} \cdot 4^{\frac{1}{4}}}{0,125^{1,33} \cdot 1,65^{\frac{3}{8}}} = 886,2 \text{ МПа} \quad (14)$$

Найденные величины давления – это давление в разрядной камере перед выходом из сопла, т.е. это давление у стенок разрядной камеры (рис. 1, а). Для разрушения породы в скважине необходимо поток сжатой паровоздушной смеси направить через сопло на обрабатываемую поверхность (рис. 5).

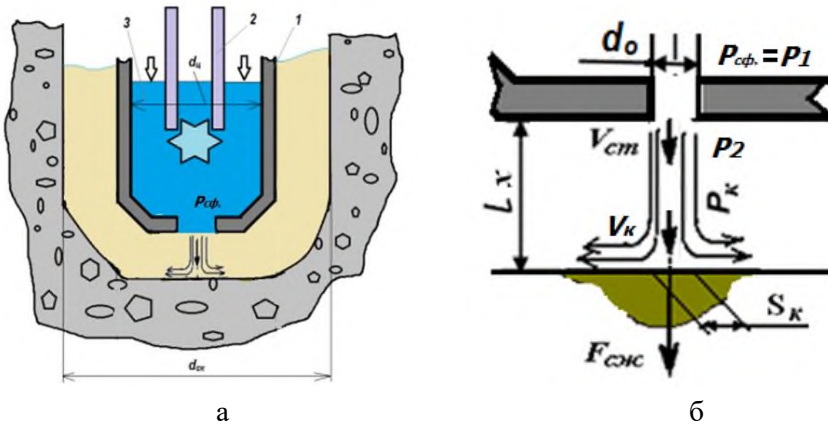


Рисунок 5 – Схема расчета давлений

Как было сказано выше, давление фронта ударной волны паровоздушного облака в сферической зоне  $P_{сф}$  равно давлению на выходе из сопла  $P_1$ , т.е.  $P_{сф} = P_1$ . Тогда на выходе из сопла давление будет  $P_2$ . Воспользуемся уравнением Бернулли:

$$\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 = \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + H_{дл} \quad (15)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты Кориолиса;  $P_1, P_2$  – давление соответственно на входе и выходе из сопла;  $\frac{P_1}{\rho g}, \frac{P_2}{\rho g}$  – пьезометрический напор воды;  $Z_1, Z_2$  – геометрический напор воды;  $H_{дл}$  – потери напора по длине потока.

Если принять, что  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ ,  $V_2 = V_{cm}$ ,  $P_2 = 0$ ,  $Z_1 = Z_2 = 0$  где  $P_2$  – атмосферное давление, то потери напора определяются как

$$H_{\text{дл}} = \frac{\lambda V_{cm}^2}{2gd_c}, \quad (16)$$

где  $\lambda = 64/Re$  – коэффициент Дарси для круглой трубы,  $Re$  – число Рейнольдса,  $d_c$ ,  $l$  – соответственно, диаметр и длина канала сопла.

Тогда уравнение Бернулли имеет вид:

$$\frac{\lambda V_{cm}^2}{2gd_c} - \frac{P_1}{\rho g} = 0 \quad (17)$$

Отсюда скорость ударной волны на выходе из сопла будет:

$$V_{cm}^2 = \frac{2P_1gd_c}{\rho g \lambda l_x} \quad \text{или} \quad V_{cm} = \sqrt{\frac{2P_1d_c}{\rho \lambda l_x}}. \quad (18)$$

Число Рейнольдса для воздуха определяется по приведенной формуле [14]:

$$Re = \frac{vd_c\rho}{\mu_1} = \frac{1722 \cdot 0,1 \cdot 1,088 \cdot 10^3}{0,6178 \cdot 10^{-3}} = 30,325 \cdot 10^6 \quad (19)$$

где  $v$  – средняя скорость воздуха в трубе,  $v \approx 1722$  м/с (см. выше);  $d_c$  – диаметр сопла,  $d = 0,1$  м (принят конструктивно);  $\rho$  – плотность паровоздушной смеси,  $\rho = 1,049 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (см. выше);  $\mu_1$  – коэффициент динамической вязкости перегретого пара,  $\mu_1 = 4560 \cdot 10^{-8}$  Па·с [15].

Коэффициент Дарси  $\lambda = 64/Re = 64/30,325 \cdot 10^6 = 2113 \cdot 10^{-3}$ .

Тогда по зависимости (18) скорость на выходе из сопла будет:

$$V_{cm} = \sqrt{\frac{2P_1d_c}{\rho \lambda l_x}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 886,2 \cdot 10^6 \cdot 0,1}{1,088 \cdot 10^3 \cdot 2113 \cdot 10^{-3} \cdot 0,01}} = 878,04 \text{ м/с.}$$

До достижения поверхности породы скорость ударной волны снижается, величину которой можно определить по зависимости, приведенной в работе [14]. Здесь следует уточнить, что приведенная зависимость хотя и относится к высокоскоростной струе воды, но

назначение то же самое – разрушение твердого материала, и здесь также участвуют те же параметры (давление, скорость и плотность).

Скорость потока паровоздушной смеси на поверхности материала можно определить по формуле, приведенной в той же работе [14]:

$$V_k = V_{cm} e^{-\frac{C_x \rho S_{cm}}{2m} x} = 877,7 \text{ м/с}, \quad (20)$$

где  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса,  $C_x = 1,12 - 1,28$  [16],  $S_{cm}$  – площадь поперечного сечения потока струи ввиду незначительного расстояния  $l_x$  можно принять равной площади отверстия сопла:

$$S_{cm} = S_c = \frac{\pi d_c^2}{4} = 0,00785 \text{ м}^2,$$

$x$  – расстояние от сопла до поверхности материала,  $x = 0,1 \text{ м}$ ,  $m$  – масса воздуха,  $m = 1,29 \text{ кг в } 1 \text{ м}^3$ .

Из-за близкого расстояния скорость потока паровоздушной смеси изменяется незначительно.

Воспользовавшись зависимостью (2), можно определить давление фронта ударной волны на поверхности контакта с материалом:

$$P_K = \frac{F_{сж}}{S_K} = \frac{\rho_{см} \cdot V_{ув}^2}{g} = 387,11 \text{ МПа} \geq [\sigma_{сж}]$$

Как видно из данных таблицы, скорость потока паровоздушной смеси, создаваемого электрогидроимпульсным способом при напряжении генератора импульсов до 26 кВ, дает давление контакта на поверхности материала, достаточное для разрушения практически всех горных пород, так как их предел прочности меньше получаемого давления, за исключением базальта.

**Условие прочности твердого тела (горной породы)** установлено Ш. Кулоном. Оно базируется на том, что разрушение горных пород при действии на них сжимающих нагрузок происходит либо в результате сдвига одних частей относительно других, либо вследствие отрыва этих частей друг от друга, так как предельные касательные напряжения и напряжения отрыва значительно меньше сжимающих [12]. На практике разрушение горной породы происходит при

значительно меньшем внешнем напряжении в 100 – 1000 раз, чем теоретическое её значение. Это связано с неоднородностями структуры горных пород (наличие трещин, пор, включений и др.). Например, предел прочности на разрушение при растяжении гранита 19 МПа, модуль упругости  $E=1,1 \cdot 10^{10}$  Па, а теоретическая прочность гранита может быть  $1,1 \cdot 10^3$  МПа, что в 58 раз больше реальной прочности [12, 13].

Таблица 1 – Физико-механические свойства магматических и метаморфических пород [10]

Породы	Временное сопротивление сжатию, $[\sigma_{сж}]$ МПа	
	В сухом состоянии	В водонасыщенном состоянии
Граниты	48 - 280	35 - 215
Гранито-гнейсы	68 - 175	63 - 168
Сиениты	100 - 250	78 - 230
Диориты	62 - 278	59 - 225
Габбро	112 - 375	110 - 277
Базальты	100 - 500	95 - 450
Диабазы	310 - 370	----
Кварциты	90 - 329	----
Мраморы	20 - 200	10 - 160
Андезиты	83 - 250	80 - 230
Известняки	8,4 - 250	7,5 - 220
Доломиты	4,5 - 250	3,3 - 245

## Выводы

Как известно, разрушение материала и потеря первоначальных размеров, свойств и других характеристик происходит при превышении внешней нагрузки предела прочности материала.

Давление, создаваемое на поверхность материала электрогидроимпульсным способом, превышает предел прочности пород камней, следовательно, такая технология применима для разрушения крепких пород природных камней.

При электрогидроимпульсном способе разрушение поверхностного слоя на площадке контакта с потоком паровоздушной смеси

происходит за счет импульсного воздействия энергии, при котором, кроме сжатия, также имеет место отрыв (откол) и срез частиц камня.

### Литература

1. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект. – Машгиз М. Л., 1955. – 52 с.
2. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. — 155 с.
3. Савченко А. В. Совершенствование скважинной технологии гидроимпульсного воздействия на горные породы при добыче полезных ископаемых: Авт. дисс... к.т.н.; спец. 25.00.22-«Гео-технология» (подземная, открытая и строительная); 05.05.06 – «Горные машины» / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2009. – 23 с.
4. Эликбаев К. Т. Обоснование параметров водоструйной машины для обработки материалов: канд. дисс... техн. наук: 05.05.06 – горные машины. – Бишкек, 2013. – 132 с.
5. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.
6. Ахметов М. Н., Ахметов Н. Д., Гимадеев М. М., Кривошеев В. А. О скорости фронта ударной волны при высоковольтном электрическом разряде в воде. // Прикладная физика, No 6. – Набережные Челны: 2015. [https://studylib.ru/doc/2029451/o-skorosti-fronta-udarnoj-volny-pri-vysokovol.\\_tnom](https://studylib.ru/doc/2029451/o-skorosti-fronta-udarnoj-volny-pri-vysokovol._tnom). Дата посещения: 3.04.2023.
7. Электропроводность воды. <https://www.growmir.ru/blog/elektroprovodnost-vody/> Дата посещения: 4.04.2023.
8. Гулый Г. А. Научные основы разрядноимпульсных технологий. — Киев: Наук, думка, 1990. – 208 с.
9. Малюшевский П. П. Основы разрядно-импульсной технологии. – Киев: Наук.думка, 1983. – 272 с.
10. Справочник по добыче и переработке нерудных строительных материалов [Текст]: / Валюжинич В. Я. и др.– Л.: Стройиздат. 1975. – 575 с.
11. Ахметов Н. Д., Гимадеев М. М., Друлис В. Н. и др. Некоторые результаты экспериментально-теоретического исследования

- процесса распространения ударных волн при электрическом разряде в воде. // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2001. – №3. – С. 38 – 41.
12. Нескоромных В. В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ / Учеб. пособие // Нескоромных В. В. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 396 с.
  13. Спивак А. И. Разрушение горных пород при бурении скважин: учебник для вузов / Спивак А. И., Попов А. Н. – М.: Недра, 1986. – 208 с.
  14. Число Рейнолдса. [https://tehspravka.org/wp-content/uploads/2017/04/CHislo-Rejnoldsa-Kriterij-Rejnoldsa\\_.pdf](https://tehspravka.org/wp-content/uploads/2017/04/CHislo-Rejnoldsa-Kriterij-Rejnoldsa_.pdf) Дата посещения 12.05.2023.
  15. Коэффициент динамической вязкости <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazy-raznye/dinamicheskaya-vyazkost-gazov-i-razgov>. Дата посещения: 12.05.2023.
  16. Зеленин Л. Н. Закономерность разрушения горных пород струей воды при давлении до 2000 атм. [Текст]: / Зеленин Л. Н. // В кн.: Вопросы горного дела. – М.: Углетехиздат. 1958. – С. 87 – 112.
  17. Дудышев В. Д. Электрогидроударное устройство для бурения скважин. Патент RU 144631 U1, Оpubл. 27.08.2014.
  18. Нестеров В. И., Золотов В. П., Семенов В. С. Мобильная электрогидродинамическая буровая установка. Патент RU2725373C2. Оpubл. 02.07. 2014.