

# Определение динамических нагрузок на электродную систему при шпуровом электроразрядном разрушении грунтов

А. Р. Ризун, В. А. Поздеев, А. Н. Рачков, В. Ю. Кононов

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [iipt@iipt.com.ua](mailto:iipt@iipt.com.ua)

Разработана методика и выполнен расчет динамических нагрузок в шпуре при электроразрядном разрушении грунта.

*Ключевые слова:* электроразрядное разрушение, шпур, электродная система, взрывчатые вещества, схема силового нагружения.

УДК 621.3.03:537.5:622.236

## ВВЕДЕНИЕ

Для разрушения высокопрочных грунтов в местах, где использование взрывчатых веществ недопустимо, как альтернативу используют высоковольтные электрические разряды с высоким потенциалом энерговыделения. Для преобразования электрической энергии в механическую работу используется специально разработанная электродная система, которая укладывается в шпур, заполненный водой. Катод и анод электродной системы подключены к генератору – накопителю энергии с напряжением 25 кВ (рис. 1). Запасенная энергия ёмкостного накопителя генератора разрушения прочных грунтов имеет величину, как правило, 100 кДж и больше. Для эффективной работы такого оборудования требуются высоконадежные преобразователи энергии – электродные системы, поскольку они находятся в самом центре активной зоны канала разряда.

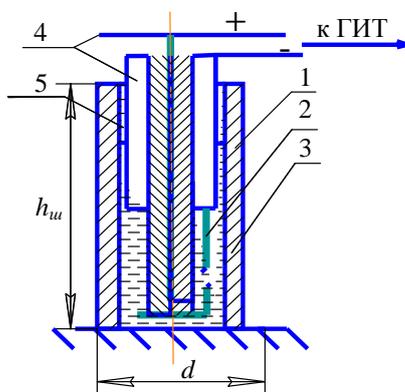


Рис. 1. Схема преобразователя энергии: 1 – шпур; 2 – канал разряда; 3 – рабочая среда; 4 – электроды; 5 – забойка.

Цель работы – определить давление в шпуре, являющееся основным разрушающим фактором для грунта и основным воздействием на элементы электродной системы.

*Методика расчета взаимосвязи выделяющейся энергии в шпуре с давлением расширяющегося канала разряда*

Процесс расширения канала разряда приближенно можно описать следующими уравнениями [1], выражающими закон сохранения энергии при изменении давления и объема плазмы канала разряда в процессе его расширения:

$$p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} \cdot \frac{d(pV)}{dt} = N(t), \quad (1)$$

$$V \frac{dp}{dt} + \gamma \frac{dV}{dt} p = (\gamma-1)N(t), \quad (2)$$

где  $\gamma$  – эффективный показатель адиабаты для плазмы ( $\gamma = 1,25$ ), Вт;  $t$  – время, с;  $N$  – мощность в канале разряда,

$$N(t) = \frac{dW}{dt}, \quad (3)$$

где  $W = \frac{pV}{\gamma-1}$  – внутренняя энергия разряда, кДж.

Объединив уравнения (1), (2), (3), после несложных преобразований запишем общее уравнение баланса энергии:

$$V \frac{dp}{dt} + \gamma \frac{dV}{dt} p \approx \frac{\gamma+1}{2} \left( V \frac{dp}{dt} + p \frac{dV}{dt} \right) = \frac{\gamma+1}{2} \cdot \frac{d(pV)}{dt}. \quad (4)$$

Уравнение баланса энергии с учетом выполненных преобразований можно приближенно представить в виде:

$$\frac{d(pV)}{dt} = 2 \left( \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) \frac{dW}{dt}. \quad (5)$$

Интегрируя (5) с учетом нулевых начальных условий ( $t = 0; p = 0; V = 0$ ), получим:

$$\left. \begin{aligned} p(t) \cdot V(t) &= 2 \left( \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) W(t) \\ W(t) &= \int_0^t N(t) dt \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Введем безразмерные величины [1, 2]:

$$\bar{p} = \frac{p}{A_1 n_1}, \quad (7)$$

$$\bar{W} = \frac{V}{V_0}, \quad (8)$$

где  $\bar{p}$  – безразмерная величина давления;  $A_1, n_1$  – постоянные Тета ( $A_1 = 300$  МПа,  $n_1 = 7$ );  $\bar{W}$  – безразмерная величина энергии;  $V_0$  – объем жидкости в шпуре, м<sup>3</sup>.

Шпур заполняют водой и устанавливают электрод, закрывают забойкой. Таким образом, замкнутый объем шпура  $V_{ум}$  состоит из объема жидкости  $V_0$  и объема электрода  $V_{эл} = 0,00065$  м<sup>3</sup>.

Тогда применительно к данной конструкции электродной системы

$$V_{ум} = V_0 - V_{эл} = 0,00015 + 0,00065 = 0,0008 \text{ м}^3.$$

Уравнение баланса (1) или в упрощенном виде (6) следует дополнить уравнением гидродинамики, дающим еще одну зависимость давлений на стенки канала и объема канала:

$$F(p, V) = 0. \quad (9)$$

Конкретный вид зависимости (9) определяется параметрами рабочей среды. В безграничной жидкости или при достаточно большом объеме камеры уравнение (9) связывает гидродинамическое давление, выраженное расширением канала разряда. При этом вид уравнения определится и геометрией плазменной (а затем и парогазовой) полости.

В данном случае ввиду малого замкнутого объема камеры и относительно небольшого объема жидкости в шпуре с электродной системой воспользуемся квазистатическим подходом вывода уравнения (9), предложенным в [3]. В основе этого подхода из-за малого объема шпура использованы следующие допущения:

- давление в канале разряда равно давлению жидкости в шпуре;
- давление жидкости и давление плазмы зависят лишь от времени и не зависят от пространственных координат.

Тогда плотность жидкости определится величиной текущего объема:

$$\bar{\rho}' = \rho' / \rho'_0 = V_0 / V_{жс} = 1 / \bar{V}_{жс}, \quad (10)$$

$$\text{где} \quad \bar{V}_{жс} = \frac{V_{жс}}{V_0}; \quad (11)$$

$\bar{\rho}'$  – безразмерная величина плотности;  $\rho'$  – плотность возмущенной воды в шпуре, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho'_0$  – начальная плотность воды в шпуре, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{жс}$  – объем возмущенной жидкости в шпуре, м<sup>3</sup>;  $\bar{V}$  – безразмерная величина объема.

Так как в любой момент времени выполняется равенство:

$$V_0 = V_{жс}(t) + V(t), \quad (12)$$

то

$$\bar{V} = (V_0 - V) / V_0 = 1 - \bar{V}, \quad (13)$$

где  $V$  – объем канала разряда, м<sup>3</sup>.

Совместное решение (10) и (13) дает соотношение:

$$\bar{\rho}' = (1 - \bar{V})^{-1}. \quad (14)$$

В то же время из уравнения состояния воды имеем:

$$p_{жс} = p = A_1 (\bar{\rho}'^{n_1} - 1), \quad (15)$$

Или с учетом (14) уравнение (15) примет вид:

$$p = A_1 \left[ (1 - \bar{V})^{-n_1} - 1 \right]. \quad (16)$$

Выражение (16) преобразуем к виду:

$$\bar{V} = 1 - \frac{1}{(\bar{p} n_1 + 1)^{1/n_1}}. \quad (17)$$

Уравнение (17) является вторым уравнением, связывающим давление в канале  $\bar{p}$  и объем канала  $\bar{V}$ .

Таким образом, имеем систему уравнений:

$$\bar{p} \cdot \bar{V} = 2 \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \bar{W}(t), \quad (18)$$

$$\bar{V} = 1 - \frac{1}{(1 + n_1 \cdot \bar{p})^{1/n_1}}.$$

Подставив второе уравнение системы (18) в первое, получим:

$$\bar{p} \left[ 1 - (1 + n_1 \bar{p})^{-1/n_1} \right] = 2 \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \bar{W}(t), \quad (19)$$

где

$$\bar{W} = \frac{W}{A_1 n_1 V_0}. \quad (20)$$

Точное решение нелинейного уравнения (19) вызывает трудности, поэтому рассмотрим два предельных случая.

Первый случай:  $0 < \bar{p} n_1 < 0,1$ . Тогда  $(1 + n_1 \bar{p})^{-1/n_1} \approx 1 - \bar{p}$  и уравнение (20) примут вид:

$$\bar{p}^2 \approx 2 \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \bar{W}(t). \quad (21)$$

Откуда найдем:

$$\bar{p}(t) = \sqrt{2 \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \frac{W(t)}{A_1 n_1 V_0}}, \quad (22)$$

или

$$p = A_1 \sqrt{2n_1 \left( \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) \frac{W(t)}{A_1 V_0}}. \quad (23)$$

Другое асимптотическое приближение получим в допущении, что  $0,1 \leq n_1 \bar{p} \leq 10$ . Тогда (19) примет вид:

$$\bar{p} \left[ 1 - \frac{1}{(n_1 \bar{p})^{1/n_1}} \right] = 2 \left( \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) \bar{W} \quad (24)$$

или

$$\bar{p} \approx 2 \left( \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) \bar{W}. \quad (25)$$

Перейдя в (25) к размерным параметрам, получим:

$$p(t) = 2 \left( \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) \cdot \frac{W}{V_0}. \quad (26)$$

В указанных диапазонах изменений возможна аппроксимация:

$$\bar{p} \left[ 1 - \frac{1}{(1+n_1 \bar{p})^{1/n_1}} \right] \approx -0,25 + 0,45 \bar{p}, \quad (27)$$

тогда

$$\bar{p} = \frac{0,25}{0,45} + 2 \left( \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) \cdot \frac{1}{0,45} \cdot \bar{W} \quad (28)$$

или

$$\bar{p} = 0,56 + 4,4 \left( \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) \cdot \bar{W}. \quad (29)$$

Переходя в (29) к размерным величинам, получим:

$$p = 1180 + 4,4 \left( \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) \cdot \frac{W(t)}{V_0}. \quad (30)$$

При  $\gamma = 1,25$ ,  $n_1 = 7$ ,  $A_1 = 300$  МПа для давления в шпуре получим следующие представления:

$$p(t) = \begin{cases} 700 \left( \frac{W}{V_0} \right)^{\frac{1}{2}} & \text{при } 0 < \bar{p} < 1,0 \\ 550 + 200,0 \frac{W}{V_0} & \text{при } 1,0 \leq \bar{p} \leq 10,0 \\ 413,0 \cdot \frac{W}{V_0} & \text{при } \bar{p} > 10,0. \end{cases} \quad (31)$$

Давление  $p$  получено в мегапаскалях, энергия  $W$  – в килоджоулях, а объем  $V_0$  – в кубических сантиметрах. В случае импульсного рыхления грунта, принимая  $V_0 = 150 \text{ см}^3$ , получим:

$$p(t) = \begin{cases} 57,1 \sqrt{W}, & 0 < W < 200, \\ 550 + 1,3W, & 200 \leq W \leq 600, \\ 1,8W, & W > 10. \end{cases} \quad (32)$$

На рис. 2 показана зависимость давления от энергии канала разряда.

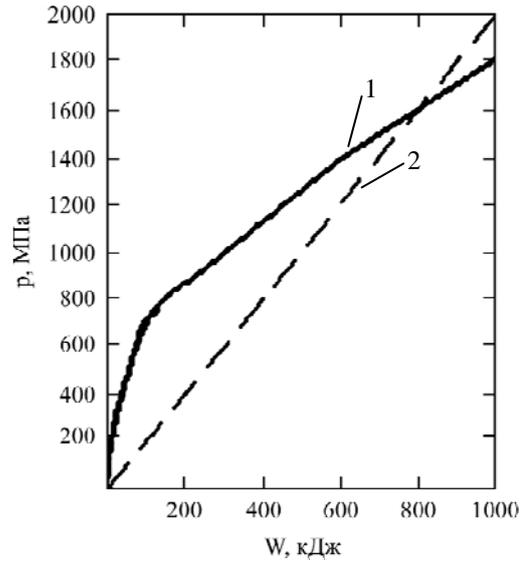


Рис. 2. Зависимость давления от энергии канала разряда высокоэнергетических систем закрытого и открытого объема: 1 – зависимость давления от энергии канала разряда в закрытом объеме; 2 – зависимость давления в канале разряда от запасенной энергии в открытом объеме.

Кривая 1 выполнена по предложенной методике для закрытого объема, кривая 2 выполнена по методике, разработанной в работе [4] для открытого объема. В первой фазе разряда давление до 1600 МПа превышает давление в открытом объеме, а затем при разрушении выравнивается. Полученные результаты дают основание использовать разработанную методику для расчета нагрузок на электродные системы в закрытых объемах.

Для разрушения высокопрочных скальных грунтов требуются большие энергии разрядов. В работе [5] установлена зависимость энергии  $W$  для разрушения грунта от его прочности, радиуса и глубины разрушения:

$$W = R_p^2 \frac{\sigma_{сж} \cdot h_{ун}}{B_3}, \quad (33)$$

где  $R_p$  – радиус разрушения грунта, м;  $\sigma_{сж}$  – прочность грунта на сжатие, Па;  $h_{ун}$  – глубина шпура (глубина разрушения), м;  $B_3$  – коэффициент энергоучета, установленный экспериментально для грунтов от 20 МПа и выше,  $B_3 = 8,0$ .

На рис. 3 представлена графическая зависимость этих показателей.

На практике с целью снижения габаритов электроразрядного оборудования и повышения его надежности, мобильности используют высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ) [6]. В таких разрядах помещают в небольших количествах высокоэнергетические экзотермические смеси (ЭС), состоящие из окислителя (аммиачной селитры) и горючего (алюминиевого порошка) (рис. 4).

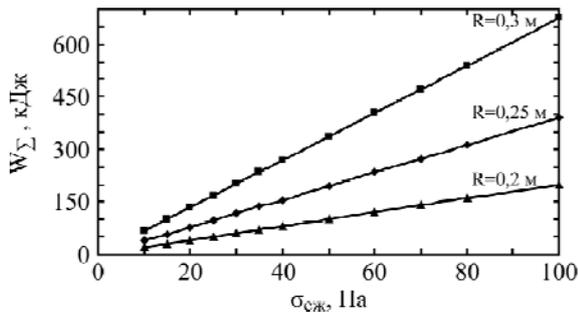


Рис. 3. Зависимость требуемой величины энергии  $W$  для разрушения грунта с различной прочностью.

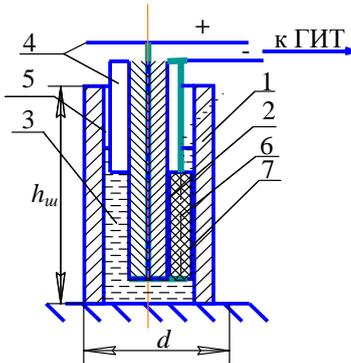


Рис. 4. Схема при инициировании электроразряда экзотермическими смесями: 1 – шпур; 2 – канал разряда; 3 – рабочая среда; 4 – электроды; 5 – забойка; 6 – экзотермическая смесь; 7 – капсула.

На рис. 5 показана экспериментально установленная [7] зависимость энерговыделения от массы ЭС при инициировании электроразрядов с запасенной энергией 6 кДж и напряжением 25 кВ.

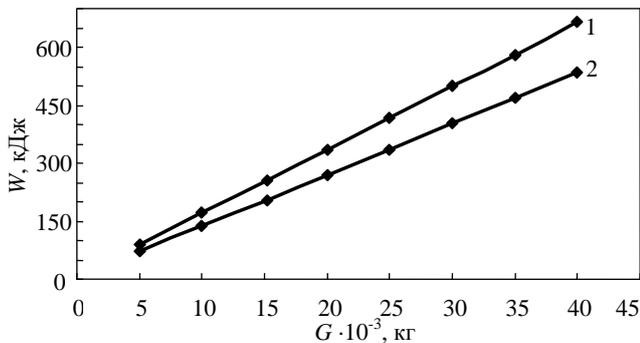


Рис. 5. Зависимость энерговыделения от массы ЭС: 1 – ЭС с 60% Al; 2 – ЭС с 40% Al.

Такой комплекс оборудования имеет вес на порядок меньше, чем без инициирования, а энерговыделение может превышать более 1000 кДж.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЫВОДЫ

При электроразрядном разрушении высокопрочных грунтов электродная система испытывает давление волн сжатия в шпуре до 2000 МПа.

Разработанная методика позволяет получить оценку динамических нагрузок на стенки шпура и на элементы электродной системы, находящиеся в объеме шпура, в зависимости от прочности разрушаемого грунта и необходимой величины энергии для его разрушения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971. 155.
2. Иванов В.В., Швец И.С. О влиянии начального радиуса канала на параметры подводного искрового разряда. В кн.: *Физические основы электрогидравлической обработки материалов*. Киев: Наукова думка, 1978. 10–14.
3. Цуркин В.Н., Мельник А.В. Влияние объема воздушной полости на закон перемещения передающего элемента электроразрядного генератора упругих колебаний. *Сборник докладов V Международной научной школы-семинара «Импульсные процессы в механике сплошных сред»*. Николаев: Атолл, 2003. 30–31.
4. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208.
5. Ризун А.Р., Голень Ю.В., Денисюк Т.Д., Поздеев В.А. Разработка и внедрение технологического процесса электроразрядного разрушения донных грунтов. *Наука та інновації*. 2008, (3), 50–54.
6. Вовченко А.И., Посохов А.А. *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. Киев: Наукова думка, 1992. 168.
7. Ризун А.Р., Голень Ю.В., Денисюк Т.Д. Сейсмически безопасные расстояния при рыхлении донных грунтов высоковольтным электрохимическим взрывом. *ЭОМ*. 2008, (3), 89–91.

Поступила 24.12.14

После доработки 07.07.15

## Summary

The technique is developed and the dynamic loads in the blast hole at the discharge destruction of soil are calculated.

*Keywords: electric discharge destruction, holes, electrode system, explosives, power loading scheme.*