

DOI: 10.18698/0236-3941-2016-1-123-131

УДК 537.427.6

## ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ РАЗРЫХЛЕНИЯ СМЕРЗШЕГОСЯ УГЛЯ

К.К. Ким, М.А. Шпилев

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I, Санкт-Петербург, Российская Федерация  
e-mail: KimKK@inbox.ru; Shpilev.Mikhail@mail.ru

*Трудности разгрузки смерзшегося угля из железнодорожных вагонов в зимнее время выливаются в финансовые потери, исчисляемые сотнями миллионов рублей. Предложено для разрыхления (восстановления сыпучести) смерзшегося угля использовать электрогидроимпульсный эффект. Приведены математическая модель электрогидроимпульсного процесса с учетом сжимаемости жидкости и деформации разрядной полости, оценка получаемого давления в смерзшемся угле; устанавливается качественная и количественная взаимосвязь между электрическими параметрами разряда и гидравлическим давлением в замкнутой сферической полости.*

**Ключевые слова:** электрогидроимпульсный эффект, восстановление сыпучести смерзшегося угля, ударные волны в жидкости.

## ELECTROHYDROPULSE INSTALLATION FOR LOOSENING THE ADFREEZED COAL

К.К. Kim, М.А. Shpilev

Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russian Federation  
e-mail: KimKK@inbox.ru; Shpilev.Mikhail@mail.ru

*The difficulties of unloading the adfrozen coal from the rail carriages in winter constantly lead to financial losses estimated up to hundreds of millions roubles. Therefore, we suggest using the electrohydropulse effect to restore the looseness. By carrying out joint scientific research, we examined the electrical and hydrodynamic processes in the fluid and the mechanical processes in the solid substance. In this paper we give a mathematical model of the electrohydropulse process in the condition of compressing the fluid and deforming the discharge cavity. Moreover, we estimated the obtained pressure in the adfrozen coal and established the quantitative and qualitative interconnection between the electrical parameters of the discharge and the fluid pressure in the spherical cavity.*

**Keywords:** electrohydropulse effect, loosening the adfrozen coal, shock waves in the liquid.

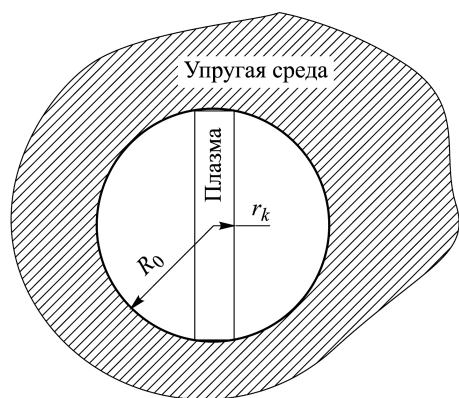
Электрогидроимпульсный эффект (эффект Юткина) возникает при инициировании электрического разряда (с помощью ёмкостного накопителя) в ионопроводящей жидкости и сопровождается возникновением ударных волн и гидродинамических течений, способных совершать механическую работу. Авторами было предложено использовать данный эффект для восстановления сыпучести смерзшегося угля при его разгрузке из железнодорожных полувагонов в зимний период [1, 2].

Для этого в сферическом угольном монолите бурится система шпуров (радиусом  $R_0 = 2$  см). В них помещаются электроды, на концах которых закреплены одноразовые электровзрывные патроны. В герметичном патроне, заполненном жидкостью, расположены два электрода, которые соединены тонкой электровзрывной проволокой. Стенки патрона должны плотно прилегать к стенкам шпура. При подаче напряжения ( $\sim 50$  кВ) на электроды возникает электрический ток, мгновенно разогревающий проволоку, что приводит к ее испарению и по продуктам испарения формируется плазменный канал разряда. Благодаря интенсивному разогреву канала разряда разрядным током в жидкости образуется парогазовая полость, которая увеличивает свой объем за счет повышения давления в ней. Это приводит к возникновению ударной волны в жидкости с последующим механическим воздействием на стенки шпура, в результате происходит разрыхление сопредельного объема сферического угля вокруг шпура [3, 4].

Одно из основных требований следующее: вызванные механические воздействия должны приводить к разрыхлению всего массива сферического угля, не приводя к разрушению конструкции полувагона.

Задачу выбора оптимального числа электродов, необходимых для разрушения массива угля (при заданных размерах полувагона), а также наиболее эффективного взаимного расположения электродов в пределах полувагона в настоящее время достаточно легко решить с помощью программ конечно-элементного моделирования (ANSYS, COMSOL Multiphysics и др.).

Указанная задача решается с помощью математической модели, связывающей параметры разрядной цепи и гидродинамические процессы в жидкости, оказывающие воздействие на окружающую твердую среду.



**Рис. 1. Геометрическая модель разрядной полости**

При разработке математической модели были приняты следующие предположения и допущения:

- размеры упругой среды (угольный массив) многократно превышают разрядную полость, что позволяет в качестве геометрической модели использовать модель сферической разрядной полости (рис. 1);

- время нарастания разрядного тока много больше времени пробега звука от оси до стенки разрядной полости, т.е. эффект образования обратной ударной волны в

жидкости не играет существенной роли, а гидродинамические процессы в жидкости можно рассматривать как квазистатические. При этом предполагается, что давление в жидкости распространено равномерно;

- инициирование канала разряда осуществляется с помощью электровзрывной проволоочки, закрепленной между катодом и анодом внутри патрона. Диаметр проволоочки составляет 0,1 мм;

- канал разряда принимается цилиндрическим (с радиусом  $r_k$ );

- формирование канала разряда происходит на начальной стадии пробоя за счет испарения проволоочки и жидкости, при этом испарившейся жидкостью пренебрегаем за малостью величины;

- вещество канала разряда — плазма с проводимостью  $\sigma = 10^4 (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ ;

- расширение канала происходит за счет увеличения внутренней энергии плазмы, а не за счет вовлечения новых частиц жидкости, т.е. предполагается, что стенки канала непроницаемы для жидкости [5]);

- упругая среда обладает следующими механическими характеристиками: модуль упругости  $E = 2,8 \cdot 10^9$  Па, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,25$ , средневзвешенная плотность  $\rho_0 = 1500 \text{ кг/м}^3$ ;

- движение стенки разрядной полости осуществляется в рамках теории взрывного давления Тимошенко в неограниченной среде [6].

По мере выделения электрической энергии в канале пробоя и далее по завершении этого процесса канал разряда, расширяясь, действует на разрушаемое тело подобно поршню, генерируя в нем переменное во времени и пространстве поле механических напряжений. Энергетический баланс на этой стадии может быть представлен следующим образом:

$$W = A + E + E_T + E_{\text{из}} + E_{\text{ис}}, \quad (1)$$

где  $W$  — энергия, выделяемая в канале разряда;  $A$  — работа, затрачиваемая на расширение канала разряда;  $E$  — внутренняя энергия канала разряда;  $E_T$  — потери энергии за счет теплопроводности за пределы объема канала;  $E_{\text{из}}$  — потери энергии, обусловленные световым излучением;  $E_{\text{ис}}$  — потери энергии, связанные с истечением вещества канала разряда в окружающую жидкую среду.

Согласно работам [5, 7] можно исключить из рассмотрения в формуле (1) потери на световое излучение, теплопроводность и истечение вещества за малостью данных величин. В связи с этим используется следующее выражение:

$$W = A + E, \quad (2)$$

т.е. считается, что энергия  $W$ , поступившая в канал разряда, расходуется на работу по расширению канала разряда  $A$  и увеличение внутренней энергии плазмы канала разряда  $E$ .

Уравнение энергии в канале разряда (2) можно записать в виде [5]

$$\frac{i^2(t)}{\pi \cdot r_k^2 \sigma} = \frac{1}{\eta - 1} \frac{d(\pi r_k^2 P)}{dt} + P \frac{d\pi r_k^2}{dt}, \quad (3)$$

где  $P$  — давление в канале разряда;  $\eta$  — показатель адиабаты плазмы ( $\eta = 1,26$ ).

Преобразуем правую часть уравнения (3)

$$\frac{i^2(t)}{\pi^2 r_k^2 \sigma} = \frac{dr_k^2}{dt} \left( \frac{P\eta}{\eta - 1} \right) + \frac{r_k^2}{\eta - 1} \frac{dP}{dt}. \quad (4)$$

Входящее в уравнение (4) давление в канале  $P$  равно давлению в жидком объеме, для которого можно записать уравнение состояния в форме Тэта:

$$P = P_0 [(\rho/\rho_0)^\alpha - 1], \quad (5)$$

где  $P_0 = 3,05 \cdot 10^8$  Па;  $\alpha = 7,15$ ;  $\rho$  — текущая плотность жидкости;  $\rho_0$  — начальная плотность жидкости.

При этом считается, что давление в канале разряда равно давлению в жидкости, т.е. распределено однородно и зависит только от соотношения текущей и начальной плотностей воды или от обратной величины отношения для объемов жидкости:

$$\frac{V_0}{V} = \frac{\frac{4}{3}\pi R_0^3}{\frac{4}{3}\pi(R_0 + U) - 2(R_0 + U)\pi r_k^2}, \quad (6)$$

где  $U$  — скорость перемещения стенки полости.

Введем в рассмотрение переменную  $x$ , являющуюся обратной величиной относительного изменения плотности воды в жидком объеме:

$$x = \frac{V}{V_0} = \frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{U}{R_0}\right)^3 - \frac{3}{2} \left(1 + \frac{U}{R_0}\right) \left(\frac{r_k}{R_0}\right)^2. \quad (7)$$

В соответствии с уравнением состояния в форме Тэта (5) имеем

$$P = P_0 ((\rho/\rho_0)^\alpha - 1) = P_0 (x^{-\alpha} - 1). \quad (8)$$

Исключим из уравнения (4) производную радиуса канала по времени, для этого представим ее в следующем виде:

$$\frac{dr_k}{dt} = \frac{dr_k}{dP} \frac{dP}{dt}. \quad (9)$$

Из уравнения (8) получаем

$$\frac{dP}{dr_k} = -\alpha P_0 (x^{-\alpha} - 1) \frac{dx}{dr_k} = 3\alpha P_0 (x^{-\alpha} - 1) r_k \frac{R_0 + U}{R_0^3}. \quad (10)$$

Тогда уравнение (9) с учетом (10) примет следующий вид:

$$\frac{dr_k}{dt} = \frac{dr_k}{dP} \frac{dP}{dt} = \frac{dP}{dt} \frac{R_0^3}{3\alpha P_0 (x^{-\alpha} - 1) (R_0 + U) r_k}. \quad (11)$$

Входящую в правую часть уравнения (11) переменную  $r_k$  получаем при совместном рассмотрении уравнений (7) и (8):

$$r_k = \sqrt{\frac{2 \left[ \left(1 + \frac{U}{R_0}\right)^3 - \left(\frac{P}{P_0} + 1\right)^{\frac{-1}{\alpha}} \right] R_0^3}{3 (R_0 + U)}}. \quad (12)$$

Тогда выражение (9) в соответствии с (11) и (12) принимает вид

$$\frac{dr_k}{dt} = \frac{dr_k}{dP} \frac{dP}{dt} = \frac{dP}{dt} \frac{R_0^3}{3\alpha P_0 (x^{-\alpha} - 1) (R_0 + U)} \times \left( \frac{2 \left[ \left(1 + \frac{U}{R_0}\right)^3 - \left(\frac{P}{P_0} + 1\right)^{\frac{-1}{\alpha}} \right] R_0^3}{3 (R_0 + U)} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Введем в рассмотрение функцию

$$F(P, U) = \frac{R_0^3}{3\alpha P_0 (x^{-\alpha} - 1) (R_0 + U)} \times \left( \frac{2 \left[ \left(1 + \frac{U}{R_0}\right)^3 - \left(\frac{P}{P_0} + 1\right)^{\frac{-1}{\alpha}} \right] R_0^3}{3 (R_0 + U)} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Тогда уравнение (4) принимает вид

$$\frac{dP}{dt} = \frac{i^2(t)}{\pi^2 r_k^2 \sigma} \left( 2r_k \frac{P\eta}{\eta - 1} F(P, U) + \frac{r_k^2}{\eta - 1} \right)^{-1}. \quad (15)$$

Движение стенки сферической полости описывается обыкновенным дифференциальным уравнением вида [5]

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + 2\gamma \frac{df}{dt} + 2\gamma \frac{c_1}{R_0} f = -\frac{R_0}{\rho_0} P(t), \quad (16)$$

где  $c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_0}}$  — скорость распространения волн объемной деформации (скорость продольной звуковой волны);  $\gamma = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \frac{c_1}{R_0}$ ;  $E$  — модуль Юнга и  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

При этом радиальное перемещение выражается через  $f$  по формуле

$$U = -\frac{1}{c_1} \frac{1}{r} \frac{df}{dt} - \frac{1}{r^2} f. \quad (17)$$

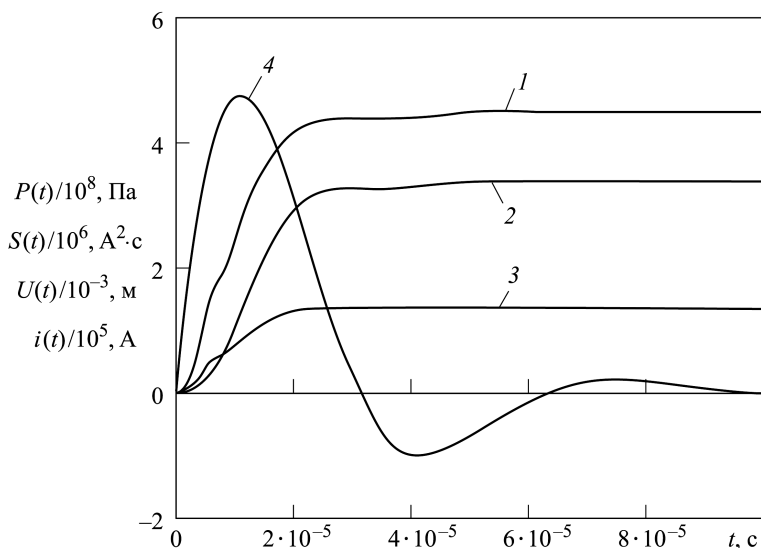
Для точек, лежащих на поверхности сферической полости ( $r = R_0$ ), получим

$$U = -\frac{1}{c_1} \frac{1}{R_0} \frac{df}{dt} - \frac{1}{R_0^2} f. \quad (18)$$

Таким образом, уравнения (7), (14), (15), (16), (18) образуют замкнутую систему, которую можно решить численными методами.

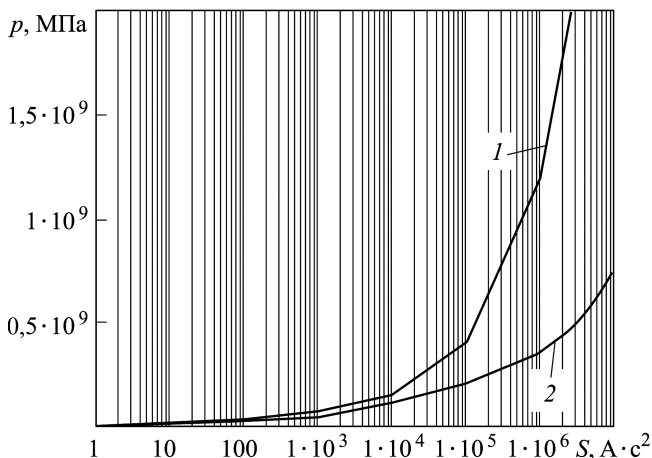
Результаты расчета для случая протекания через канал разряда колебательного импульса тока  $i(t) = I_m \exp(-\delta t) \sin(\omega t)$  представлены на рис. 2. Расчет был проведен при следующих параметрах:  $I_m = 1\,000\,000$  А;  $\delta = 50\,000$  с<sup>-1</sup>;  $\omega = 100\,000$  с<sup>-1</sup>;  $E = 2,8 \cdot 10^9$  Па;  $\nu = 0,25$ ;  $\rho_0 = 1500$  кг/м<sup>3</sup>;  $R_0 = 0,04$  м;  $\sigma = \sigma = 10^4$  (Ом·м)<sup>-1</sup>;  $P_0 = 3,05 \cdot 10^8$  Па;  $\alpha = 7,15$ ;  $\eta = 1,26$ .

Из рис. 2 следует, что форма давления (кривая 2) близка к ступенчатой, а время нарастания до максимального значения составляет десятки микросекунд, что лежит в характерном диапазоне электрогидроимпульсного эффекта (порядка 10... 200 мкс) и совпадает с экспериментальными данными.



**Рис. 2. Расчетные зависимости:**

1 —  $S(t)$ ; 2 —  $P(t)$ ; 3 —  $U(t)$ ; 4 —  $i(t)$



**Рис. 3. Зависимости давления ( $P$ ) от интеграла действия тока ( $S$ ):**  
 1 — при  $E = 2,8 \cdot 10^9$  Па; 2 — при  $E = 30 \cdot 10^9$  Па

Введем в рассмотрение величину  $S$  — интеграл действия тока, определяемую выражением

$$S = \int_0^t i^2(t) dt.$$

Экспериментальные и расчетные данные показывают, что максимум давления определяется этой интегральной характеристикой импульса тока, т.е. зависит не только от амплитуды тока ( $I_m$ ), но и от длительности импульса. Поэтому достижения одного и того же максимума давления можно добиться, как увеличением амплитуды, так и длительности импульса. Была проведена серия расчетов, по результатам которой построены зависимости максимума давления от интеграла действия тока (рис. 3).

Амплитуда давления может достигать  $(5 \dots 7) \cdot 10^8$  Па (см. рис. 3, кривая 1). Однако для этого необходимо создавать токи с интегралом действия  $(0,5 \dots 1) \cdot 10^7$  А<sup>2</sup>·с. В этих случаях при характерных длительностях импульса до 200 мкс амплитуда тока должна составлять 1,5... 2 МА, что вызывает определенные трудности при создании разрядной установки.

В заключение отметим, что деформация разрядной полости приводит к значительному снижению максимума давления. Так, расчет при модуле упругости  $E = 30 \cdot 10^9$  Па (что соответствует бетону) показывает многократное возрастание давления в полости (кривая 2 см. рис. 3) по сравнению с расчетом при  $E = 2,8 \cdot 10^9$  Па.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ким К.К., Штилев М.А. К вопросу об эффективной технологии разгрузки смерзшегося угля / Транспорт Российской Федерации. 2012. № 1 (38). С. 66–67.

2. Патент на полезную модель 120633 U1. Разгрузочный комплекс. МПК В65G 67/30 В65G 69/20 / К.К. Ким, М.А. Шпилев. Опубл. 20 мая 2012 года.
3. Ким К.К., Шпилев М.А. Рыхление смерзшегося угля электрогидравлическим методом / Мир транспорта. 2013. № 2. С. 48–55.
4. Ким К.К., Шпилев М.А. Анализ пространственно-временной структуры напряженного состояния смерзшегося угля при воздействии квазиточечных импульсных источников нагружения / Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 4. С. 12–17.
5. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 155 с.
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
7. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. СПб.: Наука, 1993. 276 с.

## REFERENCES

- [1] Kim K.K., Shpilev M.A. On the efficient unloading technology for frozen coal. Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation], 2012, no. 1 (38), pp. 66–67 (in Russ.).
- [2] Kim K.K., Shpilev M.A. Razgruzochnyy kompleks [Unloading Complex]. Patent granting for useful model no. 120633 U1, МПК В65G 67/30 В65G 69/20. May, 20. 2012.
- [3] Kim K.K., Shpilev M.A. Loosening of Adfreezed Coal by Electric-Hydraulic Method. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation], 2013, no. 2, pp. 48–55 (in Russ.). <http://dx.doi.org/10.1234/XXXX-XXXX-2013-2-48-55>
- [4] Kim K.K., Shpilev M.A. Analysis of the Spatial and Temporal Structure of the Stress State of Frozen Coal under the Influence of Quasi-Point Pulse Loading Sources. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and Electrical Transport], 2013, no. 4, pp. 12–17 (in Russ.).
- [5] Naugol'nykh K.A., Roy N.A. Elektricheskie razryady v vode [Electrical Discharges in the Water]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 155 p.
- [6] Timoshenko S.P., Goodyear J.N., Theory of Elasticity, N.Y., McGraw Hill.
- [7] Semkin B.V., Usov A.F., Kurets V.I. Osnovy elektroimpul'snogo razrusheniya materialov [Fundamentals of Electric Pulse Material Destruction]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1993. 276 p.

Статья поступила в редакцию 23.05.2015

Ким Константин Константинович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Теоретические основы электротехники” Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9.

Kim K.K. — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering department, Petersburg State Transport University.

Petersburg State Transport University, Moskovsky prospekt 9, Saint Petersburg, 190031 Russian Federation.

Шпилев Михаил Анатольевич — ассистент кафедры “Теоретические основы электротехники” Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9.



Shpilev M.A. — Assistant of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering department, Petersburg State Transport University.  
Petersburg State Transport University, Moskovsky prospekt 9, Saint Petersburg, 190031 Russian Federation.

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Ким К.К., Шпилев М.А. Электрогидроимпульсная установка для разрыхления смерзшегося угля // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 1. С. 123–131. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-1-123-131

**Please cite this article in English as:**

Kim K.K., Shpilev M.A. Electrohydropulse installation for loosening the adfrozen coal. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no.1, pp. 123–131. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-1-123-131

---

**Вниманию авторов журнала**

**“Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Машиностроение”**

Редакция журнала принимает к рассмотрению статьи, оформленные в соответствии с действующими правилами, по следующей тематике

**Механика**

- Теоретическая механика
- Механика деформируемого твердого тела
- Механика жидкости, газа и плазмы
- Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры
- Биомеханика

**Машиностроение и машиноведение**

- Машиноведение, системы приводов и детали машин
- Трение и износ в машинах
- Роботы, мехатроника и робототехнические системы
- Технология и оборудование механической и физико-технической обработки
- Технология машиностроения
- Технологии и машины обработки давлением
- Сварка, родственные процессы и технологии
- Методы контроля и диагностика в машиностроении
- Машины, агрегаты и процессы
- Теория механизмов и машин
- Организация производства
- Стандартизация и управление качеством продукции