

Метод оценки полей давлений при высоковольтном электрохимическом взрыве в закрытых объемах

В. С. Крутиков, А. Р. Ризун, Ю. В. Голень

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

Предложенный метод оценки волновых полей давления высоковольтного электрохимического взрыва в закрытых объемах с использованием излучения энергии с подвижных границ при сгорании экзотермической смеси дает возможность оценить параметры этого взрыва при разрушении грунтов.

Ключевые слова: высоковольтный электрохимический взрыв, энергия высоковольтного электрохимического взрыва, волновые поля давления, удельные затраты энергии, напряженность поля.

УДК 534.222.2

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ) – это комплекс физико-химических явлений, протекающих при попадании в зону канала разряда веществ или составов, способных к экзотермическим химическим превращениям в условиях, развивающихся в канале разряда высоких температур и давлений. Высвобождающаяся при этом энергия суммируется с электрической, исходящей из емкостного накопителя генератора импульсных токов (ГИТ) ВЭХВ. Она используется, в частности, для рыхления донных грунтов шпуровым способом. Причем диаметр шпура должен быть не меньше диаметра электрода (в пределах 0,04–0,05 м). Шпуры заполняются водой и после установки электродной системы глушатся забойками, поэтому ВЭХВ происходит в закрытом объеме. Применяемые при этом экзотермические смеси (ЭС) не причисляются к взрывчатым веществам (ВВ), поскольку инициируются электроразрядом и не требуют соблюдения особых условий техники безопасности, как для ВВ. Задача данной статьи состоит в исследовании некоторых сложных физических явлений ВЭХВ, происходящих в закрытых (шпуровых) объемах, которые невозможно установить экспериментально, а также численными методами.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расчет энергии и давления в закрытых объемах, например шпурового разряда при рыхлении донных грунтов, с использованием высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ) связан с разрешением нескольких сложнейших фундаментальных физических и математических проблем, которые до настоящего времени не нашли своего полного разрешения. ВЭХВ – это ком-

плексный механизм разрушения, объединяющий электроразряд и горение высокоэнергетических экзотермических смесей.

Электроразряд при ВЭХВ выполняет двойную роль. Во-первых, является источником для образования первоначальной волны давления, во-вторых, служит электрозапалом для зажигания экзотермической смеси. Вклад реакции экзотермической смеси в общее количество энергии, выделяющейся в расширяющейся полости, когда неизвестны ни закон горения смеси, ни количество прореагировавшей и оставшейся части определить с достаточной степенью точности не удастся ни экспериментально, ни численными методами. При этом на эффективность реакции горения экзотермических добавок максимально влияют такие факторы, как волновые поля давления и температура плазмы канала разряда. Оптимальная экзотермическая реакция происходит только при конкретных значениях давления, которое определить численно невозможно из-за многофакторности процессов при ВЭХВ [1]. Давление – один из определяющих факторов рассматриваемых процессов, знание полей давлений позволит более корректно установить вклад реакции экзотермических добавок в общий энергетический баланс.

Цель данной работы – оценить волновые поля давления, которые генерируются в закрытых объемах плазменным поршнем электрического разряда, с подвижной поверхности которого происходит излучение, вызванное реакцией экзотермической смеси.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сложность рассматриваемой задачи заключается в следующем. Как известно, волновое уравнение в теории волн имеет фундаментальное значение. Движение границы плазменного

поршня в сжимаемой среде является частным случаем движения излучающей границы, когда скорость излучения (проницаемости) равна нулю. При этом для определения волнового поля нельзя решить ни обратную (по заданному закону изменения давления в точке волновой зоны), ни прямую задачи (по известному закону изменения радиуса плазменного поршня). Ранее в работах [4, 5] был решен и сравнен с экспериментом комплекс обратных задач, в том числе расширение плазменного поршня в замкнутом объеме. По заданной форме функции давления вне оболочки, заполненной и погруженной в сжимаемую среду, восстановлено: перемещение оболочки; волновое поле давления внутри объема оболочки, включая подвижную поверхность расширяющейся в ней плазменной полости; а также закон ввода энергии в плазменную полость. Представляет большой теоретический и практический интерес решение подобных, но более сложных задач, когда с поверхности расширяющегося плазменного поршня происходит излучение, вызванное экзотермическими реакциями.

Для определенности рассмотрим характерный (основной в математической физике) случай сферической симметрии. Волновое уравнение имеет вид [2]:

$$\varphi_{tt} - a^2 \varphi_{rr} - (\nu - 1) a^2 r^{-1} \varphi_r = 0, \quad r \geq R(t), \quad (1)$$

$$\varphi_t(r, 0) = \varphi(r, 0) = 0, \quad R(0) = r_0, \quad (2)$$

$$\rho \varphi_r|_{r=r_1} = P = f\left(t - \frac{r_1 - r_0}{a}\right), \quad (3)$$

$$-\varphi_r = v|_{r=R(t)} = F_1(t), \quad R(t) = F_2(t), \quad (4)$$

$$v(R(t), t) \neq dR(t)/dt - \text{проницаемая граница.} \quad (5)$$

Здесь t – время; φ – потенциал скорости; $\nu = 1$ – для плоской, $\nu = 2$ – для цилиндрической, $\nu = 3$ – для сферической симметрии; $R(t)$, r_0 , r , r_1 – координаты: подвижных границ, начальная, текущая, точки волновой зоны соответственно; ρ , a – постоянные; v – скорость; P – давление; (5) – условие проницаемости (излучения) подвижной границы. Условия могут быть заданы на подвижной границе (ПГ) – этим определяется класс прямых задач (4). И только в фиксированной точке волновой зоны – этим определяется класс обратных задач (3). При решении обратных задач необходимо реконструировать значения исследуемых функций в других точках, включая подвижные границы. При этом закон движения границы неизвестен, как правило, нелинеен и подлежит определению. Наличие проницаемости ПГ вносит коррективы в эти понятия, появляются смешанные дополнительные условия [2].

Давление в точке r_1 волновой зоны характеризуется многофакторной зависимостью $P(r_1, t) = f$;

функция f может быть аппроксимирована разными способами: элементарными функциями, их комбинациями и т.д. [3, 5]. Для общего случая, когда, например, при решении прямых задач форма функции давления неизвестна, аппроксимируем f полиномом Лагранжа степени m (A_m – постоянные коэффициенты). Запишем

$$P(r_1, t) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m \xi^m, \quad \xi = t - (r_1 - r_0)/a. \quad (6)$$

Вся информация о том, что возмущения распространяются от проницаемой подвижной границы, содержится в коэффициентах A_m . Используя методы обратных задач с учетом взаимодействия нелинейных аргументов [2, 3, 6], получим давление и скорость частиц в любых точках. На подвижных границах они имеют вид:

$$P(R(t), t) = \frac{r_1}{R(t)} \sum_{m=0}^{\infty} A_m \xi^m - \frac{1}{2} \rho v^2(R(t), t);$$

$$\xi = t - \frac{R(t) - r_0}{a}, \quad (7)$$

$$\frac{v(R(t), t) R^2(t) \rho}{r_1} =$$

$$= \frac{R(t)}{a} \sum_{m=0}^{\infty} A_m \xi^m + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A_m}{m+1} \xi^{m+1},$$

где $\rho = \text{const}$ – плотность среды, $v(R(t), t)$ – скорость частиц среды на проницаемой подвижной границе, при этом $v(R(t), t) \neq dR(t)/dt$.

Изменение объема в единицу времени dV/dt по «наблюдаемому» изменению радиуса подвижной границы в рассматриваемом случае будет иметь две составляющие как для цилиндрической (2), так и для плоской (1) симметрии ν [2, 5, 6]:

$$dV/dt = dV_1/dt + dV_2/dt, \quad (9)$$

где dV_1/dt – изменение объема, которое обуславливает изменение скорости частиц среды, соприкасающихся с подвижной границей; dV_2/dt – изменение объема, вызванное испарением с внутренней поверхности подвижной границы (плазменного поршня) наблюдаемого радиуса.

Известно, что объем жидкости, протекающий через замкнутую поверхность, равен изменению объема в единицу времени [7], то есть $dV_1/dt = 4\pi r^2 v(r, t)$, где v – соотношение из (8), имеет место в любой точке, включая подвижные границы. Тогда соотношение (9) записывается следующим образом:

$$\frac{[R^3(t) - r_0^3] \rho}{3r_1} = \frac{R(t)}{a} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A_m}{m+1} \left(t - \frac{R(t) - r_0}{a}\right)^{m+1} +$$

$$+ \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A_m}{(m+1)(m+2)} \left(t - \frac{R(t) - r_0}{a}\right)^{m+2} + \frac{V_2 \rho}{4\pi r_1}, \quad (10)$$

где A_m несут информацию о движении проницаемой границы. $R(t)$ из этого уравнения вычисля-

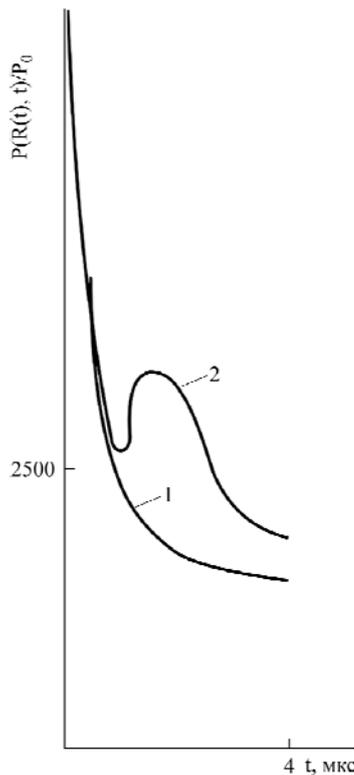


Рис. 1. Изменение давления на подвижной (1) и движущейся излучающей (2) границах.

ется по методу, изложенному в работах [2, 6, 8–10], а при неизвестных r_0 и r_1 используется метод [10].

Подобные рассуждения проведены, и они адекватны случаю излучающей подвижной границы в сжимаемой среде, в том числе для системы излучающих источников, находящихся на движущейся поверхности.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены профили давления на подвижных границах (ПГ): кривая 1 – непроницаемая ПГ ($dR(t)/dt = v(R(t), t) = 350 \exp(-\alpha t)$), рассчитанная методом характеристик системы уравнений движения, сплошности и состояния [2]:

$$v_t + v \cdot v_r + \rho^{-1} P_r = 0, \quad \rho_t + (\rho v)_r + (v-1)\rho v = 0, \\ (P+B)/(P_0+B) = (\rho/\rho_0)^n$$

с соответствующими граничными и начальными условиями (B, n – постоянные, $v = 3$); кривая 2 – излучающая ПГ, определенная по соотношениям (7) и (8):

$$dR(t)/dt < v(R(t), t) = 525 \exp(-\alpha t), \quad (11)$$

$$R(t) = r_0 + \frac{350}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha t)], \quad (12)$$

где $r_0 = 1$ мм, $\alpha = 1 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, $\rho = 102 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ – общий для этих случаев закон изменения радиуса ПГ. На рис. 2 представлен профиль давления в точке $r_1 = 0,08$ м (6). Результаты вычислений с

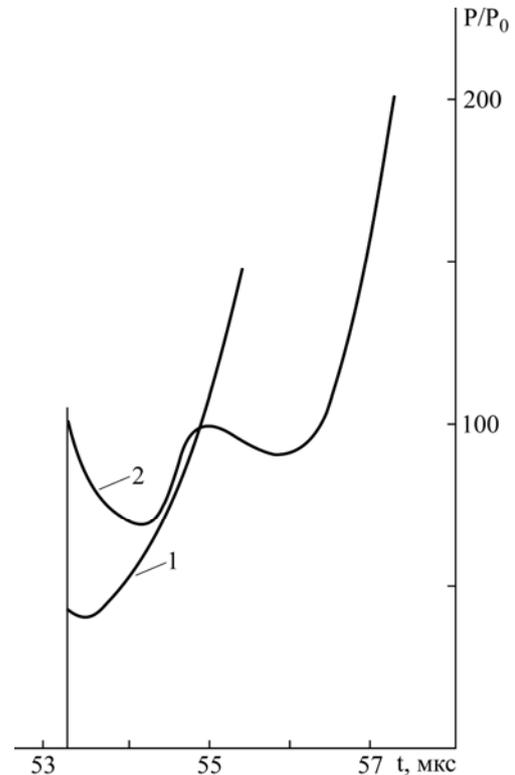


Рис. 2. Изменение во времени давления в точке волновой зоны $r_1 = 80 \cdot 10^{-3}$ м, генерируемого непроницаемой (1) и излучающей (2) границами.

учетом (10)–(12) приведены в работах [2, 3, 5] и др.

Анализ полученных профилей давления показывает, сколь велики могут быть погрешности определения исследуемых функций по наблюдаемому изменению радиуса подвижной границы. В начальные мгновения, при некоторых соотношениях значений радиуса и скоростей частиц на излучающей ПГ, происходит уменьшение давления P вплоть до отрицательных значений (кривая 2, значение $P(R(t), t)$ при $t \approx 1$ мкс). Подобная ситуация, когда $v(R(t), t) > dR(t)/dt$, может возникнуть в некоторых случаях при реакции экзотермических добавок, инициированных электрическим взрывом, лазерным импульсом. Развитые подходы позволяют рассмотреть различные варианты, например уменьшение во времени радиуса и увеличение (уменьшение) скорости частиц на ПГ. Предложенный метод оценки полей давления при ВЭХВ позволяет, определив давление на излучающей подвижной границе плазменного поршня, дальнейшие расчеты волновых полей в замкнутом объеме проводить в соответствии с [4, 5].

Из вышесказанного следует, что решение актуальных физических и математических проблем подвижных излучающих границ можно использовать для оценки волновых полей, индуцированных расширяющимся плазменным поршнем электрического разряда, с поверхности которого происходит излучение в результате реакции эк-

зотермической смеси. Это дает возможность построить более корректную физико-математическую модель обратной задачи управления сложных процессов ВЭХВ, более корректно определить вклад реакции экзотермических добавок в общий энергетический баланс.

ВЫВОДЫ

1. Профили давления, полученные с учетом излучения, вызванного реакцией экзотермических добавок (при ВЭХВ), при сопоставлении с прочностью грунтов позволяют установить параметры ВЭХВ и объемы разрушения.

2. Предложенный вариант оценки давлений в закрытых объемах сжимаемых сред может быть альтернативным и использован взамен сложных, дорогостоящих экспериментальных измерений.

3. Предложенный метод может быть положен в основу разработки методики расчета силового воздействия ВЭХВ на обрабатываемый объект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовченко А.И., Посохов А.А. *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
2. Крутиков В.С. Волновые явления с учетом конечных перемещений проницаемых границ. *Доклады РАН*. 1993, **333**(4), 512–514.
3. Крутиков В.С. Об одном новом подходе решения обратных задач для волнового уравнения в областях с подвижными границами. *Доклады РАН*. 1999, **364**(1), 17–20.
4. Крутиков В.С. О взаимодействии слабых ударных волн со сферической оболочкой с учетом подвижности границ. *Известия РАН. МТТ*. 1992, (2), 170–178.
5. Крутиков В.С. Гидродинамика импульсных процессов (методика решения задач с подвижными границами). Препринт № 26. Николаев: ИИПТ НАН Украины, 1995. 54 с.
6. Крутиков В.С. Волны, окружающие расширяющийся проницаемый цилиндр в сжимаемой среде. *Доклады РАН*. 1999, **368**(6), 755–758.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика*. Т. VI. М.: Наука, 1986. 736 с.
8. Крутиков В.С. Об одном решении обратной задачи для волнового уравнения с нелинейными условиями в областях с подвижными границами. *Прикладная математика и механика*. 1991, (6), 1058–1062.
9. Крутиков В.С. Об одной обратной задаче для волнового уравнения в областях с подвижными границами и об итерационном методе определения функций управления. *Доклады РАН*. 2006, **406**(1), 1–5.
10. Крутиков В.С. Определение местоположения дополнительных условий – основа однозначной реконструкции волновых полей в областях с подвижными границами и функций управления. *Труды акустического симпозиума «КОНСОНАНС-2011»*. Киев, ИГМ НАНУ. 2011. С. 170–176.

Поступила 03.10.13

После доработки 11.11.13

Summary

A method is proposed to evaluate wave fields of pressure of the high-voltage electrochemical explosion in closed volumes using radiation energy with moving boundaries by the combustion of the exothermic reaction mixture. This makes it possible to estimate the parameters of a high-voltage electrochemical explosion at the destruction of soil.

Keywords: high-voltage electrochemical explosion, energy of high-voltage electrochemical explosion, wave fields of pressure, energy cost per unit, field strength.