

3. Катцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. М.–Л., 1950.  
4. Зацепина Г. Н. Физические свойства и структура воды. М., 1987.

Поступила 26.06.02

### Summary

The transfer processes of neutral and charged particles to plasma zone in atmospheric pressure glow discharge system with electrolyte cathode was investigated by means of special constructed device. Solutions of LiCl, NaCl, KCl, RbCl and KCl, KBr, KJ was used as cathode. On the base of solution volume decrease velocity the transfer coefficients was calculated. These values equal 500 – 1100 molecules/ion. The qualitative analysis helped to estimate the transfer coefficients for anions –  $10^{-2}$  –  $10^{-1}$  ion/ion and molecular product – 1–30 molecule/ion.

В.В. Иванов, А.Н. Щербак

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЯЮЩИХ КОМПОЗИЦИЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

В настоящее время для усиления характеристик подводных электрических взрывов (ПЭВ) используются энерговыделяющие среды (ЭС). Они представляют собой смесь веществ, способных под действием мощных электрических разрядов выделять химическую энергию [1]. ЭС используются либо в патронированном виде, либо создаются специальные системы подачи в зону разряда активной среды из больших объемов отдельными порциями или непрерывно. В последнем случае необходимо предусмотреть предотвращение попадания пламени из канала разряда по трубопроводу в объем с ЭС.

Данная работа посвящена рассмотрению условий, позволяющих гасить пламя, распространяющееся по трубопроводу, наполненному ЭС. В качестве ЭС используется система на основе аммиачной селитры (окислитель) и карбамида (горючее), а в качестве пористой среды, заполняющей канал с непроницаемыми боковыми стенками, – карборунд. Такой выбор вытекает из анализа литературных данных о фильтрационном горении [2] и компонент, входящих в составы современных промышленных взрывчатых веществ (ВВ) [3]. Хорошо развитая поверхность и малый диаметр зерен карборунда обеспечивает эффективный теплоотвод и гашение пламени. ЭС на основе аммиачной селитры и карбамида (АКВ) входят в состав ВВ – карбатов, устойчивых до температур  $100^{\circ}\text{C}$ . При 3–5% содержании воды АКВ плавится при температуре выше  $50^{\circ}\text{C}$ . Добавка воды снижает температуру плавления и при 30% содержании воды АКВ представляет собой однородную жидкую фазу.

Рассмотрим характер движения газа в пористой среде из зернистого материала диаметром  $10^{-3}$  м. Переход от ламинарного течения к турбулентному определяется по формуле [4]

$$\text{Re} = \frac{\nu \cdot d}{\nu \cdot (0,75\Pi + 0,23)} = \frac{\nu \cdot d}{0,6 \cdot \nu}, \quad (1)$$

где  $\Pi$  – пористость среды,  $\Pi = 0,4–0,6$ ;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – скорость движения жидкости или газа, м/с;  $d$  – диаметр зерен пористой среды –  $10^{-3}$  м;  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

При интересующих нас давлениях  $p = 10^5 – 10^7$  Па динамическая вязкость  $\mu$  может быть оценена величиной  $(20–40) \cdot 10^{-6}$  кг/м·с, плотность газа соответственно  $\rho = 0,6, 6$  и  $60$  кг/м<sup>3</sup>. Тогда

кинематическая вязкость  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  равна  $\nu \cong (50, 5 \text{ и } 0,5) \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ .

Используя формулу (1), определим скорость движения жидкости, отвечающей переходному режиму ( $Re = 10$ ) и развитому турбулентному ( $Re=150$ )

$$\nu = \frac{Re \cdot 0,6 \cdot d}{10^{-3}} = \frac{10 \cdot 0,6 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{10^{-3}} = 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Данные вычисления соответствуют значениям  $p = 10^5$  Па и  $Re = 10$ . Результаты расчетов для других величин  $p$  и  $Re$  приведены в табл. 1. Найденные скорости могут возникать только при определенных перепадах давления  $\Delta p$ .

В [5] показано, что гидравлический коэффициент сопротивления  $f = \frac{\Delta p \cdot d}{2 \cdot \Delta l \cdot \rho \cdot \nu^2}$  находится в пределах 0,2–20 при эквивалентных значениях  $Re=150–15$ . Тогда перепад давлений равен

$$\Delta p = \frac{f \cdot 2 \Delta l \cdot \rho \cdot \nu^2}{d} = 200 \text{ Па},$$

где  $\Delta l$  – длина реакционной трубы, равная 0,1 м.

Таким образом, перепады давления оказываются очень незначительными. Аналогичные результаты получены и при исследовании движения жидкой фазы. Следовательно, движение газа и жидкости в пористой среде при осуществлении экзотермической реакции, связанной с повышением давления, всегда турбулентно, как и само горение. Турбулентность увеличивает скорость горения и дает возможность весьма сильно интенсифицировать процесс. Однако ускорение горения под действием турбулентности не может быть беспредельным, предел ускорения обусловлен переходом реакции горения в кинетическую область, где процесс выделения тепла определяется только законом Аррениуса, а основным механизмом передачи тепла молекулярной теплопроводности (или кондукцией) является закон Фурье.

Уравнение теплопроводности имеет вид [4]

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = d\nu \lambda \text{grad} T + q^1, \quad (2)$$

где  $T$  – температура, К;  $C_p$  – теплоемкость, Дж/кг·К;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $q^1$  – плотность источников тепла, то есть количество тепла, выделяющееся вследствие химической реакции в единице объема в единицу времени, Дж.

Если  $\lambda$  можно считать постоянным, то уравнение (2) приобретает вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \Delta T + \frac{Q}{C_p \rho} Z e^{\frac{E}{RT}}, \quad (3)$$

где  $Q$  – тепловой эффект реакции;  $Z, E$  – постоянные величины, характерные для данной химической реакции,  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Первый член правой части уравнения (3) характеризует падение температуры вследствие молекулярной температуропроводности, второй определяет увеличение температуры вследствие протекания химической реакции. Для зависимости температуры от времени имеем [4]

$$T = \frac{Q}{\rho C_p \sqrt{4\pi a t}} e^{-\frac{x^2}{4at}}, \quad (4)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $x$  – прогрев среды за время горения.

Основное количество энергии сосредоточено в области  $x = 2\sqrt{at}$ , средняя температура в нагретой области равна  $T^1 = \frac{Q^1}{x}$ .

Для расчета параметров пористой среды прежде всего необходимо выяснить скорость теплотеря за время реакции. Если теплотери окажутся выше допустимых и температура снизится до величины, меньшей некоторого критического значения, то реакция погаснет и самоподдерживающего процесса не будет. Теория горения [4] требует знания некоторых опорных величин, характеризующих процесс, без которых вычисления невозможны. В эти величины входят: энергия активации –  $E$ , Дж/моль; время горения –  $\tau$ , с; скорость пламени –  $v$ , м/с; теплота реакции –  $Q$ , Дж/кг; температура горения адиабатическая –  $T_a$ , К; температура горения –  $T_m$ , К.

На пределе распространения горения

$$\left(\frac{v}{v_a}\right) \leq \frac{1}{\sqrt{e}},$$

где  $v_a$  – адиабатическая скорость пламени.

Этому значению  $v/v_a$  отвечает снижение температуры пламени за счет теплотеря [4]

$$T_a - T_m > \frac{R \cdot T_m^2}{E},$$

здесь  $T_a$  – адиабатическая температура горения,  $T_m$  – температура горения.

Для реакции горения ЭС типичны следующие значения величин [3, 4]:  $E=120 \cdot 10^3$  Дж/моль;  $\tau=10^{-6}$  с;  $v=0,5$  м/с;  $Q=4 \cdot 10^3$  Дж/г;  $T_a=2700$  К;  $T_m=2500$  К.

Условия гашения пламени определяются, исходя из времени реакции, скорости теплоотдачи и критерия [4].

$$T_a - T_m^1 = \frac{RT_m^1}{E}.$$

В случае перечисленных величин теплоотвод должен обеспечивать падение температуры до величины  $T_m^1$

$$2700 - T_m^1 = \frac{8,3T_m^1}{120 \cdot 10^3}, T_m^1 = 2200 \text{ К.}$$

Время  $t$  падения температуры должно осуществляться за  $10^{-6}$  с. За это время частица инертного вещества, в парах которого происходит горение, прогреется на величину  $x=2\sqrt{at}$ . Согласно [4] понижение температуры можно оценить по соотношению

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{d}{d + x \cdot \frac{C_k \rho_k}{C_2 \rho_2}}, \quad (5)$$

где  $d$  – диаметр пористого инертного наполнителя;  $C_k \cdot \rho_k$  – теплоемкость и плотность этого наполнителя;  $C_2 \rho_2$  – теплоемкость и плотность продуктов горения. Типичное значение  $C_2 \rho_2 = 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>·град [3, 4].

В качестве наполнителя выберем карборунд SiC, который имеет следующие параметры [3, 4]:

$\rho_k=3,08 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_k=0,66 \cdot 10^3$  Дж/кг·град,  $T_{\text{разлож}}=3150$  К,  $C_k \cdot \rho_k=2 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·град,  $\lambda=4$  Вт/м·К.

Тогда для  $a=4,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с,  $x=2\sqrt{4,2 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{-6}} \approx 4 \cdot 10^{-7}$  м.

Диаметр фракции определяется из условия гашения пламени в узких каналах  $P_e(v) < 6,5$ , где  $P_e(v)$  – критическое число Пекле [4].

Определим необходимый диаметр частиц карборунда, если состав способен поддерживать горение при одной атмосфере

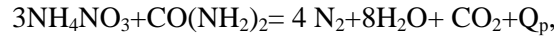
$$\frac{2200}{2700} = \frac{d}{d + 4 \cdot 10^{-7} \frac{2 \cdot 10^6}{10^3}} = \frac{d}{d + 0,8 \cdot 10^{-4}} = 0,8, \quad d = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Если давление в порах превышает  $10^6$  Па, то  $d = 10^{-4}$  м.

Таким образом, для типичных условий горения среда из карборунда должна иметь зерна диаметром  $10^{-3} - 10^{-4}$  м.

Рассмотрим конкретный пример для АКВ.

В отсутствие воды реакция запишется



где  $Q_p = 3 \cdot 10^3$  Дж/г,  $T_p = 2000$  К – температура продуктов реакции в условиях адиабатического процесса при постоянном давлении.

Представленная смесь горит в составе ВВ в детонационной волне за время  $\tau = d_k / D$ , где  $d_k$  – критический диаметр ЭС;  $D$  – скорость детонации ( $d_k = 0,15$  м,  $D = 4500$  м/с), тогда  $\tau = 3 \cdot 10^{-5}$  с.

Энергия активации этого процесса должна быть больше, чем у тротила, поскольку он является сенсбилизатором в составе карбатов, то есть можно положить  $E = 120 \cdot 10^3$  Дж/моль.

Для предотвращения самостоятельного горения в турбулентном режиме необходимо понижение температуры

$$2000 - T_m > \frac{8,3 \cdot T_m^2}{120 \cdot 10^3} \quad T_m = 1700 \text{ К}, \quad \frac{T_m}{T_p} = 0,8,$$

при  $\tau = 10^{-5}$  с,  $x = 10^{-6}$  м,  $d > 10^{-2}$  м.

Таким образом, предложенная среда из зерен карборунда размером  $10^{-3} - 10^{-4}$  м надежно предохраняет от процесса распространения пламени при использовании АКВ в качестве ЭС для усиления характеристик ПЭВ.

Если рассматривать теплообмен с учетом движения фронта пламени, то процесс охлаждения исходных и конечных продуктов усилится, поскольку увеличится поверхность теплоотдачи на величину, пропорциональную  $v \cdot t$ , где  $t$  – характерное время реакции,  $v$  – скорость движения фронта. При  $t = 10^{-6}$  с и  $v = 100$  м/с,  $v \cdot t = 0,1$  мм, то есть при средних размерах зерен карборунда того же порядка поверхность теплоотдачи возрастает вдвое.

Длину наполнения трубопровода карборундом можно оценить, рассмотрев движение волны горения в канале.

При этом сам наполнитель можно рассматривать как совокупность параллельных каналов диаметром, равным диаметрам частиц карборунда и соединенными более узкими переходными каналами.

На основе теоретических и экспериментальных исследований распространения волны в каналах постоянного сечения установлена следующая зависимость [4]:

$$\Delta p = \frac{\Delta p_1 (l_0 + l_1)}{l_0 + l_1 + x} e^{-0,4 f \frac{x}{d}},$$

где  $\Delta p_1$  – избыточное давление в волне, измеренное в некотором сечении трубы и выбранная за начальное;  $l_0$  – расстояние от центра заряда до входа в канал;  $l_1$  – расстояние от входа в канал до точки, соответствующей  $\Delta p_1$ ;  $f$  – гидравлический коэффициент сопротивления;  $x$  – переменное расстояние от сечения, соответствующего  $l_1$ .

Если в качестве исходного принять входное сечение канала и считать, что реакция произошла в отдельной частице, то

$$\Delta p = \frac{\Delta p_0 \alpha r_0}{\beta (\alpha r_0 + x)} e^{-0,4 f \frac{x}{d}},$$

где  $r_0$  – расстояние от центра заряда до входа в канал  $\approx d$ ;  $\Delta p_0$  – давление перед входом в канал.

Величина  $\alpha$  учитывает процесс перехода сферической волны в плоскую при затекании в канал, значение  $\alpha$ , полученное экспериментально, меняется от 1 до 0,3 в диапазоне  $p_0 = 10^5 - 10^9$  Па. При  $\Delta p_0 = 10^7$  Па  $\alpha = 0,6$ .

Коэффициент  $\beta$  учитывает влияние отражающей поверхности при входе в канал,  $\beta$  – увеличивается от 0,5 до 1 при росте  $\Delta p_0$  от  $10^5$  до  $10^9$  Па, при  $\Delta p_0 = 10^7$  Па,  $\beta = 0,8$ . Значение множителя  $e^{-0,4 f \frac{x}{d}}$  можно в наших расчетах принять равным единице, действительно  $f \geq 0,1$ ,  $\frac{x}{d} \geq 10$ . Тогда для

оценки падения давления при расчетах можно воспользоваться соотношением [4]

$$\Delta p = \frac{\Delta p_0 d}{x}$$

Для обеспечения падения давления на два порядка величина  $x$  должна составлять менее 0,1 м.

Пористое наполнение в виде частиц карборунда представляет собой систему каналов переменного сечения, что также приводит к гашению волны горения. Действительно, сила сопротивления складывается из двух частей сопротивления трения (выше рассмотренное) и сопротивление формы. Сопротивление связано с явлением срыва струй и образованием за обтекаемым телом зоны обратной циркуляции. Такое явление существенно для внешней задачи, в особенности для поперечного обтекания тел сложной формы, как это имеет место в рассматриваемом наполнении из частиц карборунда. Давление рассеивается при столкновении фронта с частицами.

Если рассматривать течение газа только как внутреннюю задачу движения волны в трубе переменного сечения, то гашение волны горения связано в первую очередь с расширением газа при переходе из узкой части трубы в широкую. Для приближенных оценок величины гашения обычно используется простое соотношение [4]

$$\frac{\Delta p_0}{\Delta p_{кон}} = \left( \frac{s}{s_0} \right)^{0,8}$$

где  $\frac{s}{s_0}$  отношение площадей сечений канала.

Таким образом, выполненный качественный анализ позволяет утверждать, что в случае развития турбулентного горения на входе в трубопровод с наполнителем из зерен карборунда с диаметром частиц  $10^{-3} - 10^{-4}$  м длина наполнения может не превышать 0,1 м, поскольку такая длина обеспечивает падение давления ударной волны по крайней мере на два порядка.

*Характер движения газа в пористой среде ( $d = 10^{-3}$  м)*

$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$v \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Re	$v$ , м/с	$f$	$\Delta p$ , Па
1	50	0,6	10	0,3	20	200
			150	4,5	0,2	480
10	5	6	10	0,03	20	20
			150	0,45	0,2	48
100	0,5	60	10	0,003	20	2
			150	0,45	0,2	4,8

*Примечание. Характер движения – турбулентный.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А.В., Иванов В.В., Щербак А.Н. Развитие сферической полости маломощного электровзрыва в энергоснабжающих композициях // Электронная обработка материалов. 1999. № 1. С. 14–18.
2. Бабкин В.С., Дробышев В.И., Лаевский Ю.М., Попытняков С.И. Фильтрационное горение газов // Физика горения и взрыва. 1983. № 2. С. 17–26.
3. Кутузов Б.Н., Скоробочатов В.М., Ерофеев И.Е. и др. Справочник взрывника. М., 1988.
4. Франк – Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетики. М., 1987.
5. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. М., 1961.

*Поступила 28.05.02*

## Summary

Characteristics of porous medium intended for detonation and shock wave flame extinguishing at feeding of energy extracting compositions into the electric discharge zone are presented. Carborundum is proposed to be used as filling substance. Its grain dimensions are in the range from  $10^{-3}$  m to  $10^{-4}$  m and the layer thickness varies from  $10^{-2}$  m to  $10^{-1}$  m. Examples for extinguishing of flame generate by energy extracting compositions based on ammoniac nitrate and carbamide for typical combustion conditions are considered.