

МЕХАНИКА

УДК 536.46:662.3

DOI 10.17223/19988621/35/5

В.Д. Барсуков, С.В. Голдаев, Н.П. Минькова, Н.А. Бабушкин**О ВЛИЯНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЭКРАНА
НА ПОДВОДНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ДВУХОСНОВНОГО
ТВЕРДОГО ТОПЛИВА СПИРАЛЬЮ НАКАЛИВАНИЯ,
НАГРЕВАЕМОЙ КОНДЕНСАТОРОМ¹**

Для варианта открытого газогенератора, в котором на поверхности шашки отсутствует бронировка, а локализация зоны горения обеспечивается с помощью термостойкого стакана, осуществлено обобщение ранее разработанной модели зажигания двухосновного твердого топлива под водой спиралью накаливания, разогреваемой при разряде конденсатора. Присутствие термостойкого стакана на торцевой поверхности шашки учтено в граничном условии с помощью «отрицательного источника», и он существенно влияет на время задержки зажигания, поэтому следует принимать во внимание влияние этого фактора.

Ключевые слова: газогенератор, твердое топливо, термостойкий стакан, металлический экран, спираль накаливания, электрическое сопротивление, электрическая емкость, конденсатор, напряжение, ток, зажигание, жидкая среда.

Среди многообразия газогенераторов на двухосновном твердом топливе (ДТТ), применяющихся в различных отраслях техники, можно выделить генераторы, которые работают в водной среде: при термогазохимическом воздействии на нефтяносные пласты [1], проведении аварийно-спасательных и подводно-технических операций [2] и др. Это обусловлено следующими факторами [3]: потенциальная энергия ДТТ в 2–5 раз превышает энергию сжатого воздуха, а генератор весит в 7 раз меньше, чем баллон высокого давления. Они допускают многолетнее хранение без регламентных проверок. Важно также наличие освоенной технологии изготовления ДТТ.

В ходе совершенствования подобных источников рабочего тела разработаны открытые генераторы (ОГ), у которых в качестве корпуса были сами шашки, имеющие защитные покрытия [1, 2]. Поэтому отпала необходимость упрочнения шашек, что позволило повысить их габаритно-массовые характеристики [4]. Охлаждение продуктов сгорания, подаваемых в оболочку плавучести из термостойкого материала, осуществлялось за счет их барботажа через окружающую во-

¹ Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 14.578.21.0034, уникальный идентификатор ПНИ RFMEF157814X0034.

ду. Гидродинамика всплывающих пузырьков имеет сложный характер, о чем свидетельствует опыт исследования процессов, сопровождающих работу аппаратов погружного горения [5]. Малая скорость истечения газов из работающего в дозвуковом режиме ОГ, снижала дальнобойность струи, уменьшала потери рабочего тела из пространства, окруженного кожухом, внутри которого устанавливались ОГ. Однако ОГ не позволяли прекращать их работу в случае какой-либо нештатной ситуации, например отрыва от грунта одной оконечности поднимаемого объекта [2].

Для преодоления отмеченного недостатка был разработан способ [6] подводного сжигания ДТТ, защищенный патентом [7], согласно которому в жидкости размещается шашка топлива 1 в вертикальном положении (рис. 1).

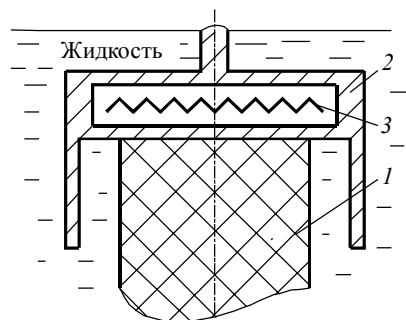


Рис. 1. Схема расположения шашки и термостойкого стакана при зажигании

В локализации зоны горения на верхнем торце перед зажиганием используется в перевернутом положении термостойкий стакан 2 (ТС), который охватывает верхнюю часть шашки, причём жидкость может полностью заполнять и образующийся между стенками и шашкой зазор. Донная часть ТС нагревается плоской спиралью накаливания 3 (ПСН) до температуры, превышающей температуру воспламенения $T_{\text{вс}}$ ДТТ. В результате обеспечивается кипение прилегающей жидкости и последующее зажигание топлива. Затем продукты горения вытесняют воду из зазора и всплывают.

За счет принудительного движения ТС вниз осуществляется поддержание горения, а погасание ДТТ происходит после остановки ТС или отвода его вверх.

Требуемая нагрузка на ТС определялась из условия, чтобы сила тяжести ТС была равна сумме сил тяги и Архимеда, создаваемых газами при оттекании от горячей поверхности и заполнении зазора между донным концом ТС и торцом шашки.

Опытная проверка предложенной схемы сжигания ДТТ в водной среде осуществлена в лабораторных условиях в резервуаре с прозрачными стенками [6]. ПСН была изготовлена из нихромовой проволоки диаметром 0.25 мм и длиной 70 мм. После подачи напряжения порядка 5 В, она развивала мощность 15 Вт, через 6–8 с осуществлялось воспламенение торцевой поверхности образца. После выхода на стационарный режим ТС отводился вверх, и горение прекращалось в течение долей секунды. Суммарное время процесса в зависимости от длины образцов изменялось в пределах 24–120 с. Результаты испытаний показали, что предложенный способ сжигания ДТТ обеспечивают безотказное воспламенение, стабильное горение, надёжное прерывание горения.

Параметры ПСН в работе [6] подбирались эмпирически, применительно к размерам зажигаемого образца и внешним условиям. В реальном подъемном устройстве могут использоваться шашки диаметром 0.2–0.4 м, а гидростатическое давление может достигать несколько МПа.

Расчет характеристик электровоспламенителя, используемого для зажигания под водой ДТТ с ТС, по упрощенной методике [9], в которой использовался критерий зажигания – достижение «температуры вспышки», а присутствие ТС на торцевой поверхности шашки учтено в граничном условии с помощью дополни-

тельного «отрицательного источника», показал, что ТС существенно влияет на время задержки, поэтому следует принимать во внимание влияние этого элемента.

Для обеспечения экстренного зажигания ДТТ можно использовать энергию заряженного конденсатора, входящего в конструкцию подрывных машинок (КПМ), широко применяемых в горнорудной промышленности [10] в качестве малогабаритного источника питания.

Характеристики серийных источников питания импульсного действия [10] приведены в таблице. Запасенная конденсаторами энергия вычислялась по формуле $E_0 = C_0 U_0^2 / 2$.

Параметры источников питания импульсного действия

№ п/п	Марка	Емкость C_0 , мкФ	Напряжение U_0 , В	Энергия E_0 , Дж	Масса, кг
1	ПИВ-100 м	10	650	2	2.7
2	КПМ –3	4	1600	5	1.6
3	ВП – 2000 м	50	1200	35	5.2

В монографии [2] представлены результаты теоретического и экспериментального анализа критических условий зажигания в водной среде стенок канала в образце ДТТ при импульсном подводе теплоты к поверхности контакта его с ПСН.

Источником энергии служили конденсаторы К-50-12, соединенные между собой параллельно, при этом емкость батареи изменялась в пределах 600...900 мкФ. Номинальное напряжение варьировалось в пределах 200–300 В. ПСН выполнялась из нихромовой проволоки $d_h = 0.25$ мм, сопротивление ПСН достигало 3–4 Ом.

Вначале цепь замыкалась на заряд конденсаторов до определенной емкости. С помощью другого переключателя производился разряд на ПСН. Возникновение устойчивого горения определялось визуально по началу истечения продуктов сгорания из канала образца в воду.

Рассмотрим вначале процесс зажигания стенок торцевой части образца ДТТ с помощью ПСН, когда пространство внутри ТС заполнено воздухом (рис. 1).

В работе [11] рассмотрена близкая задача, в которой проанализирована роль инертного вещества в виде хорошо проводящей теплоту пластинки толщиной δ_1 , идеально контактирующей одной своей поверхностью с ДТТ. На другую (внешнюю) сторону пластинки в течение времени экспозиции t_{ex} подается радиационный поток q_s .

Установлено, что если время воздействия лучистого нагрева мало, то после его отсечки образуется выпуклый температурный профиль, пластинка все время остается источником теплоты, идущей на создание расширяющегося теплового слоя [11]. Быстро понижающаяся температура поверхности ДТТ не дает возможностей для развития химической реакции. Если t_{ex} достаточно велико, то после отсечки импульса тепловой пограничный слой продолжает расти, «откачивая» теплоту из пластины. Однако достаточно высокая температура, сохраняющаяся в экране, при некотором значении толщины теплового слоя возбуждает прогрессирующее выделение теплоты от химического источника. В случае импульсного зажигания в течение некоторого времени развития процесса экран может стать стоком теплоты. Поэтому точка зажигания сдвигается внутрь ДТТ. Чем меньше t_{ex} , тем дальше от поверхности находится координата зажигания.

Физическая и математическая постановка задачи

В схеме зажигания ДТТ, изображенной на рис. 1, наличие ТС является экраном между торцевым участком поверхности образца ДТТ и ПСН, а возможность попадания воды в полость ТС будет дополнительным фактором, влияющим на результирующее количество теплоты, поступающее в ДТТ [9]. Затраты на нагрев донного участка ТС будут учтены аналогично варианту непрерывного выделения теплоты в ПСН [9] в граничном условии на поверхности образца, где расположено начало координат, а ось $0x$ – направлена в глубь ДТТ.

Воспользуемся опытом проектирования КПМ [10]. Считаем, что разряд конденсатора емкостью C_0 и заряженного до напряжения U_0 происходит во внешнюю цепь, имеющую только активное сопротивление. Изменение силы тока с течением времени t описывается выражением

$$I = \frac{U_0}{R_h} \exp\left(-\frac{t}{R_h \cdot C_0}\right), \quad (1)$$

где R_h – электрическое сопротивление проволоочки.

Плотность теплового потока, создаваемого ПСН, представляется в виде функции, экспоненциально убывающей со временем [10]:

$$q_h = q_{h0} \exp\left(-\frac{2t}{R_h \cdot C_0}\right), \quad (2)$$

где $q_{h0} = U_0^2 / (R_h \cdot S_h)$ – создаваемый ПСН максимальный тепловой поток в момент замыкания цепи; S_h – площадь нагрева, охватываемая ПСН.

В рамках тепловой теории зажигания, с использованием адиабатического критерия [12], температурное поле в ДТТ описывается дифференциальным уравнением теплопроводности, которое в безразмерных переменных имеет вид

$$\frac{\partial \Theta_k}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_k}{\partial \xi^2} + \exp\left(\frac{\Theta_k}{1 + \beta \Theta_k}\right). \quad (3)$$

Начальное и граничные условия записываются как

$$\Theta_k(\xi; 0) = \Theta_0 = \text{const} \quad \text{при} \quad \tau = 0; \quad (4)$$

$$\Theta_k(\infty; \tau) = \Theta_0 = \text{const} \quad \text{при} \quad \xi \rightarrow \infty; \quad (5)$$

$$\text{при} \quad \xi = 0 \quad -\frac{\partial \Theta_k}{\partial \xi} = q e^{(-\sigma \tau)} - n \frac{\partial \Theta_k}{\partial \tau} - \text{Bi}_c (\Theta_k - \Theta_c), \quad (6)$$

где $\Theta = (T_k / T_m - 1) / \beta$, $\tau = t / t_m$, $\xi = x / l_m$.

Входящий в формулу (6) параметр $\sigma = 2t_m / (R_h C_0)$ характеризует отношение времени адиабатической индукции t_m к времени полного разряда конденсатора, равного $t_r \cong 2.3 \cdot R_h \cdot C_0$ [10].

Масштабная температура вычислялась по формуле, предложенной в монографии [2]:

$$T_m = \left(\frac{E_k}{R_u}\right) / \ln \left[\frac{q_{h0} c_k}{(c_h \rho_h d_h z_0 Q_k)} \right], \quad (7)$$

которая следует из граничного условия (6) в предположении, что

$$Bi_c = 0, \quad \partial \Theta_k / \partial \tau = 1, \quad \partial \Theta_k / \partial \xi = 0.$$

При этом сокращается число параметров задачи, так как $q = n$.

Масштабные время, координата и плотность теплового потока находятся так [12]:

$$t_m = \beta \frac{c_k \cdot T_m}{Q_k z_0} \exp\left(\frac{1}{\beta}\right), \quad l_m = \sqrt{a_k t_m}, \quad q_m = \beta \cdot \frac{\lambda_k \cdot T_m}{l_m},$$

а безразмерные параметры определяются следующим образом:

$$\beta = \frac{R_u \cdot T_m}{E_k}, \quad q = \frac{q_s}{q_m}, \quad \Theta_0 = \left(\frac{T_0}{T_k} - 1\right) \frac{1}{\beta},$$

$$Bi_c = \frac{\alpha_{\text{eff}} l_m}{\lambda_k}, \quad q_m = \frac{q_h l_m}{\beta \lambda_k T_m}, \quad n = \frac{c_h \cdot \rho_h \cdot d_h + c_s \cdot \rho_s \cdot d_s}{c_k \cdot \rho_k \cdot x_a}. \quad (8)$$

Здесь ρ_k – плотность, кг/м³; c_k – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·К); λ_k , a_k – коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·К) и температуропроводности, м²/с; Q_k – тепловой эффект реакции, отнесенный к единице массы, Дж/кг; z_0 – предэкспоненциальный множитель, 1/с; E_k – энергия активации, Дж/моль; R_u – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); c_h , ρ_h и d_h – удельная массовая теплоемкость, плотность и диаметр проволоочки; c_s , ρ_s и d_s – удельная массовая теплоемкость, плотность и толщина донной части ТС; α_{eff} – эффективный коэффициент теплоотдачи, соответствующий свободной конвекции над горизонтальной внезапно нагретой пластинкой.

Для обоснования выбора варианта расчета α_{eff} использовались результаты экспериментальных исследований нестационарной передачи теплоты в атмосфере от тонкой пластины, лежащей на горизонтальном нетеплопроводном основании, разогреваемой при разряде батареи высоковольтных конденсаторов емкостью 2400 мкФ, имеющей начальное напряжение 500–1500 кВ. Это обеспечивало варьирование температуры в центре теплового пятна в диапазоне 300–800 К [13].

Оценки с привлечением предложенного критерия показали, что для условий импульсного разогрева ПСН, коэффициент теплоотдачи имеет квазистационарное значение, которое можно вычислить по формулам для свободной конвекции.

Приближенный аналитический метод решения

Описываемая ниже приближенная методика расчета характеристик воспламенения основана на использовании адиабатического критерия – достижения равенства в месте контакта ДТТ с ПСН скорости изменения температуры инертного нагрева ($d\Theta_{\text{ins}}/d\tau$) скорости выделения теплоты от химических реакций. Для зависимости температуры поверхности образца ДТТ от времени на инертной стадии нагрева использовалось аналитическое решение, которое имеет вид [2]

$$\Theta_{\text{ins}}(\tau) = \Theta_c + \frac{qe^{(-\sigma\tau)}}{n(a_2 - a_1)} \int_0^\tau e^{(\sigma z)} [a_2 \Psi_2(a_2 \sqrt{z}) - a_1 \Psi_1(a_1 \sqrt{z})] dz, \quad (9)$$

где для краткости одинаковые комплексы обозначены таким образом:

$$\Psi_i(a_i \sqrt{\tau}) = \exp(a_i \sqrt{\tau})^2 \operatorname{erfc}(a_i \sqrt{\tau}). \quad (10)$$

Здесь $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$ – дополнительный интеграл вероятностей.

Входящие в (9) параметры a_1 и a_2 вычисляются по формулам

$$a_1 = n(1 - \delta_1)/2, \quad a_2 = n(1 + \delta_1)/2, \quad \delta_1 = \sqrt{1 - 4n \text{Bi}_c}, \quad 1 - 4n \text{Bi}_c > 0.$$

Для нахождения момента времени, когда будет выполнено условие зажигания по адиабатическому методу, требуется многократно находить значение определенного интеграла от специальной функции. С целью сокращения объема вычислений и аварийной остановки программы из-за переполнения при нахождении значений экспоненты, формула (9) была преобразована путем выполнения операции интегрирования. Получено следующее выражение:

$$\begin{aligned} \Theta_s(\tau) = \Theta_c + \frac{w_2 \Psi_2(a_2 \sqrt{z}) - w_1 \Psi_1(a_1 \sqrt{z}) + e^{(-\sigma\tau)}(w_1 - w_2)}{(a_2 - a_1)} + \\ + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{(w_{22} - w_{12})}{(a_2 - a_1)} \int_0^\tau \frac{e^{[\sigma(z-\tau)]}}{\sqrt{z}} dz, \end{aligned} \quad (11)$$

где $w_1 = a_1 / (\sigma + a_1^2)$, $w_2 = a_2 / (\sigma + a_2^2)$; $w_{12} = a_1^2 / (\sigma + a_1^2)$, $w_{22} = a_2^2 / (\sigma + a_2^2)$.

Оценки показали, что для интересующих нас вариантов обеспечения безотказного зажигания $a_1^2 \ll \sigma$, $a_2^2 \ll \sigma$, поэтому $w_1 \cong a_1 / \sigma$, $w_2 \cong a_2 / \sigma$; $w_{12} \cong a_1^2 / \sigma$, $w_{22} \cong a_2^2 / \sigma$ и выражение (11) упрощается:

$$\Theta_{sp}(\tau) = \Theta_c + \frac{1}{\sigma} \left[\frac{a_2 \Psi_2(a_2 \sqrt{z}) - a_1 \Psi_1(a_1 \sqrt{z})}{a_2 - a_1} - e^{(-\sigma\tau)} + \frac{(a_2 + a_1)}{\sqrt{\pi}} \int_0^\tau \frac{e^{[\sigma(z-\tau)]}}{\sqrt{z}} dz \right]. \quad (12)$$

Сравнение результатов, полученных по формулам (11) и (12), показало практическое их совпадение.

Дифференцируя (12) по τ , получаем

$$\frac{d\Theta_{sp}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{\sigma} \left[\frac{a_2^3 \Psi_2(a_2 \sqrt{z}) - a_1^3 \Psi_1(a_1 \sqrt{z})}{a_2 - a_1} + \sigma e^{(-\sigma\tau)} + \frac{(a_2 + a_1)}{\sqrt{\pi\tau}} \right].$$

В этом выражении первым слагаемым в квадратной скобке можно пренебречь вследствие его малости:

$$\frac{d\Theta_{sp}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{\sigma} \left[\sigma e^{(-\sigma\tau)} + \frac{(a_2 + a_1)}{\sqrt{\pi\tau}} \right]. \quad (13)$$

Вычисление интеграла вероятностей осуществлялось по интерполяционной формуле из [14]:

$$\text{erf}(x) = 1 - z[k_1 + z(k_2 + k_3 z)] \exp(-x^2), \quad (14)$$

где $z = 1/(1 + k_0 \cdot x)$; $k_0 = 0.471$, $k_1 = 0.348$, $k_2 = -0.096$, $k_3 = 0.748$.

Использование зависимости (14) особенно удобно при нахождении произведения функций $\exp(x^2)[1 - \text{erf}(x)]$, имеющегося в (12) и (13), которое заменяется полиномом вида $z[k_1 + z(k_2 + k_3 z)]$.

Поскольку в рассматриваемой задаче тепловой поток является переменным (быстро убывающим), то при обработке результатов численных расчетов использовалось осредненное его значение, вычисляемое по формуле

$$q_{hc} = \frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} q_h dt = \frac{U_0^2}{4,6 R_h \cdot S_h}. \quad (15)$$

Отметим, что q_{hc} косвенно зависит от C_0 через t_r и влияет на параметр σ , уменьшая его с увеличением C_0 . Другой вариант обработки данных – привлечение начального значения удельной электрической энергии, равного отношению $A_0 = E_{c0} / S_h$.

Результаты численных расчетов

Параметрический анализ проведен для ПСН из нихромовых проволочек с разными диаметрами. На рис. 2 представлены расчетные данные t_z от A_0 для ДТТ типа Н. ПСН предполагалась выполненной из проволоочки длиной 140 мм и диаметром: для вариантов 1 и 2 – 0.1 мм, а в варианте 3 – 0.25 мм. При фиксированном начальном напряжении $U_0 = 1600$ В значения емкости варьировались в пределах от 4 до 40 мкФ. Тепловая нагрузка A_0 изменялась от 0.06 до 0.69 МДж/м². Время зажигания уменьшилось от 9.1 до 8.3 мс.

Установка ТС на торцевую часть шашки приводит к появлению экрана между поверхностью ДТТ и ПСН толщиной 1 мм. Варьирование U_0 от 950 до 2000 В увеличило энергию конденсатора от 22.6 до 100 Дж, соответствующая тепловая нагрузка возросла от 0.3 до 1.34 МДж/м², а время зажигания уменьшилось от 347 до 60 мс (кривая 1). Для варианта с $C_0 = 5$ мкФ и напряжением 1600 В за время разряда температура нагреваемой поверхности шашки достигла только 396 К.

В следующей серии расчетов емкость конденсатора изменялась от 10 до 80 мкФ, а напряжение оставлено равным 1600 В. Результаты представлены в виде кривой 2. Как видно, эти кривые пересекаются при $A_0 = 0.85$ МДж/м².

Для меньших значений A_0 времена задержки зажигания существенно выше, когда начальная емкость конденсатора C_0 больше. Из структуры зависимости (2) для плотности теплового потока, создаваемого ПСН, следует, что его амплитуду определяет начальное напряжение U_0 . Значение емкости оказывает влияние на развитие процесса нагрева образца во времени – при больших C_0 (параметр σ меньше) повышение температуры происходит медленнее и время зажигания повышается. Такая зависимость

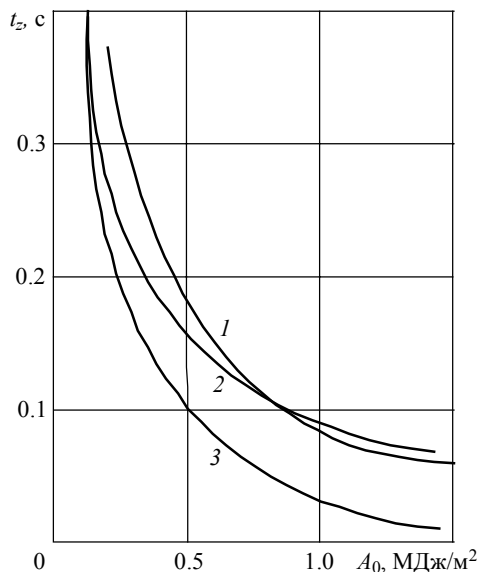


Рис. 2. Зависимость времени зажигания от тепловой нагрузки для различных диаметров проволочек при наличии экрана между ПСН и поверхностью ДТТ

характерна для источников питания с фиксированным запасом энергии, интенсивность выделения в которых зависит от U_0 и C_0 .

Изменение диаметра проволоочки сказывается через параметры n и q_{hc} . В варианте 3 была использована проволочка в 2.5 раза толще, в результате значение параметра n стало в 2.5 раз больше. Однако ее электрическое сопротивление уменьшилось в 6.25 раз, при этом осредненное значение теплового потока возросло в 6.25 раз, что привело к уменьшению времени зажигания.

Как показано ранее [2], необходимым условием зажигания ДТТ под водой является создание на его поверхности кризиса теплообмена, существенно снижающего «сток» теплоты в окружающую среду. Рассмотрен вариант, когда выделение теплоты в нагревателе происходило с постоянной интенсивностью и соответствовало квазистационарной стадии теплообмена, при котором время перехода к новому режиму было меньше времени изменения q_h .

При резком увеличении мощности нагревателя возможен переход от однофазного конвективного теплообмена к пленочному кипению с последующим нестационарным повышением температуры [15]. Поэтому в случае использования источника тока импульсного действия можно ожидать кратковременного возникновения обстановки, необходимой для зажигания [2].

Заключение

На основе адиабатического метода получены выражения для расчета характеристик зажигания торцевой части шашки ДТТ, имеющей термостойкий стакан, во внутренней полости которого размещена ПСН, нагреваемая при разряде конденсатора. Проведенный анализ показал, что наличие тонкого стального экрана между ПСН и торцевой поверхностью шашки из ДТТ приводит к существенной задержке зажигания. Для реализации этого процесса требуются источники энергии, позволяющие создавать на участке нагрева ДТТ плотность энергии более 30 МДж/м². В частности, могут быть использованы взрывные приборы типа ВП-2000.

Разработанная и реализованная на персональном компьютере методика прогнозирования дает возможность целенаправленно выбирать элементы цепи, обеспечивающие безотказное зажигание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чазов Г.А., Азаматов В.И., Якимов В.В. и др. Термогазохимическое воздействие на малодобитные и осложненные скважины. М.: Недра, 1986. 150 с.
2. Барсуков В.Д., Голдаев С.В. Подводное зажигание и горение унитарных твердых топлив. Теория, эксперимент, технические предложения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 343 с.
3. Шишков А.А., Румянцев Б.В. Газогенераторы ракетных систем. М.: Машиностроение, 1981. 152 с.
4. Барсуков В.Д., Голдаев С.В., Минькова Н.П. Совершенствование открытых газогенераторов для проведения аварийно-спасательных и подводно-технических работ // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады Всероссийской конференции. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. С. 49–50.
5. Алабовский А.Н., Удыма П.Г. Аппараты погружного горения. М.: Издательство МЭИ, 1994. 256 с.
6. Барсуков В.Д., Голдаев С.В., Минькова Н.П., Полечук С.Н. Новый способ подводного сжигания унитарного твердого топлива при движении фронта горения сверху вниз // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы конференции. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. С. 64–65.

7. Патент 2345277 РФ. Способ сжигания унитарного твердого топлива в жидкой среде / В.Д. Барсуков, С.В. Голдаев, Н.П. Минькова, С.Н. Поленчук. Оpubл. в БИ № 3 от 27.01.2009.
8. Барсуков В.Д., Голдаев С.В., Минькова Н.П. О докритическом режиме подводного сжигания унитарного твёрдого топлива при движении фронта горения сверху вниз // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: материалы конференции. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. С. 63–64.
9. Барсуков В.Д., Голдаев С.В., Минькова Н.П., Бабушкин Н.А. О зажигании под водой двухосновного твердого топлива с термостойким стаканом спиралью накалывания средней мощности // Материалы Двадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность»: в 2 т. Т. 1. Томск: СПБ Графикс, 2014. С. 163–166.
10. Граевский М.М. Справочник по электрическому взрыванию зарядов. М.: Недра, 2001. 240 с.
11. Дик И.Г., Зурер А.Б., Князева А.Г. О зажигании конденсированного вещества импульсным тепловым потоком через непрозрачный экран с большой теплопроводностью // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25. № 6. С. 3–9.
12. Виллюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука, 1984. 185 с.
13. Заславский Б.И., Юрьев Б.В. О конвективном теплоотводе от внезапно возникшего горизонтального теплового пятна // Журнал прикладной механики и технической физики. 1989. № 4. С. 112 – 116.
14. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица и И. Стигана. М.: Наука, 1979. 832 с.
15. Павлов Ю.М., Бабич В.И. Расчет кризиса теплоотдачи при быстром росте теплового потока на поверхности кипения // Теплоэнергетика. 1987. № 2. С. 8–12.

Статья поступила 26.01.2015 г.

Barsukov V.D., Goldaev S.V., Minkova N.P., Babushkin N.A. METAL SHIELD INFLUENCE ON UNDERWATER IGNITION OF A DIBASIC SOLID PROPELLANT WITH A SPIRAL HEATED BY A CAPACITOR

DOI 10.17223/19988621/35/5

The earlier developed model of underwater ignition of the dibasic solid propellant (DSP) by a spiral filament is generalized for an open gas generator in which there is no surface armor protection and burning zone localization is provided by means of a heat-resistant glass that is considered under a model boundary condition by means of an additional “negative source”. The calculations were based on the adiabatic method. The presence of a heat-resistant glass on the end face essentially affects the ignition delay time. The spiral filament is heated during the discharge of the capacitor.

To enable the required ignition process, the energy sources should produce an energy density of more than 30 MJ/m² at the DSP heating area.

Keywords: gas generator, propellant, heat-resistant glass, metal screen, spiral filament, electrical resistance, electrical capacitance, capacitor, voltage, current, ignition, fluid medium.

BARSUKOV Vitaly Dementevich (Doctor of Technical Sciences,
Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: barsukov@niipmm.tsu.ru

GOLDAEV Sergey Vasilevich (Doctor of Physics and Mathematics,
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: svgoldaev@rambler.ru

MINKOVA Natalia Petrovna (Candidate of Technical Sciences,
Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation).
E-mail: n.p.minkova@mail.ru

BABUSHKIN Nikita Aleksandrovich (graduate student,
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: atikin89@tpu.ru

REFERENCES

1. Chazov G.A., Azamatov V.I., Yakimov V.V., et al. *Termogazokhimicheskoe vozdeystvie na malodebitnye i oslozhnennyye skvazhiny*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 150 p. (in Russian)
2. Barsukov V.D., Goldaev S.V. *Podvodnoe zazhiganie i gorenje unitarnykh tverdykh topliv. Teoriya, eksperiment, tekhnicheskie predlozheniya*. Tomsk, Tomsk St. Univ. Publ., 2003. 343 p. (in Russian)
3. Shishkov A.A., Rumyantsev B.V. *Gazogeneratory raketnykh sistem*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 152 p. (in Russian)
4. Barsukov V.D., Goldaev S.V., Min'kova N.P. Sovershenstvovanie otkrytykh gazogeneratorov dlya provedeniya avariynno-spasatel'nykh i podvodno-tekhnicheskikh rabot. *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki: Doklady Vserossiyskoy konferentsii*. Tomsk, Tomsk St. Univ. Publ., 2012, pp. 49–50. (in Russian)
5. Alabovskiy A.N., Udyma P.G. *Apparaty pogrurnogo goreniya*. Moscow, Izdatel'stvo MEI, 1994. 256 p. (in Russian)
6. Barsukov V.D., Goldaev S.V., Min'kova N.P., Polenchuk S.N. Novyy sposob podvodnogo szhiganiya unitarnogo tverdogo topliva pri dvizhenii fronta goreniya sverkhu vniz. *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki: materialy konferentsii*. Tomsk, Tomsk St. Univ. Publ., 2006, pp. 64–65. (in Russian)
7. Patent 2345277 RF. *Sposob szhiganiya unitarnogo tverdogo topliva v zhidkoy srede*. V.D. Barsukov, S.V. Goldaev, N.P. Min'kova, S.N. Polenchuk. Opubl. v BI № 3 ot 27.01.2009. (in Russian)
8. Barsukov V.D., Goldaev S.V., Min'kova N.P. O dokriticheskom rezhime podvodnogo szhiganiya unitarnogo tverdogo topliva pri dvizhenii fronta goreniya sverkhu vniz. *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki: materialy konferentsii*. Tomsk, Tomsk St. Univ. Publ., 2006, pp. 63–64. (in Russian)
9. Barsukov V.D., Goldaev S.V., Min'kova N.P., Babushkin N.A. O zazhiganiy pod vodoy dvukhosnovnogo tverdogo topliva s termostoykim stakanom spiral'yu nakalivaniya sredney moshchnosti. *Materialy Dvadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost'»*, vol. 1. Tomsk, SPB Grafiks Publ., 2014, p. 163–166. (in Russian)
10. Graevskiy M.M. *Spravochnik po elektricheskomu vzryvaniyu zaryadov*. Moscow, Nedra Publ., 2001. 240 p. (in Russian)
11. Dik I.G., Zurer A.B., Knyazeva A.G. O zazhiganiy kondensirovannogo veshchestva impul'snym teplovym potokom cherez neprozrachnyy ekran s bol'shoy teploprovodnost'yu. *Fizika goreniya i vzryva*, 1989, vol. 25, no. 6, pp. 3–9. (in Russian)
12. Vilyunov V.N. *Teoriya zazhiganiya kondensirovannykh veshchestv*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984. 185 p. (in Russian)
13. Zaslavskiy B.I., Yur'ev B.V. O konvektivnom teplootvode ot vnezapno voznikshego gorizontal'nogo teplovogo pyatna. *Zhurnal prikladnoy mekhaniki i tekhnicheskoy fiziki*, 1989, no. 4, pp. 112 – 116. (in Russian)
14. Abramovits M., Stigan I. (eds.) *Spravochnik po spetsial'nykh funktsiyam*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 832 p. (in Russian)
15. Pavlov Yu.M., Babich V.I. Raschet krizisa teplootdachi pri bystrom roste teplovogo potoka na poverkhnosti kipeniya. *Teploenergetika*, 1987, no. 2, pp. 8–12. (in Russian)